

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

PAR
ANTHONY POTHIER CHAMPAGNE

COMPARAISON DE L'INFLUENCE DES INTENSITÉS DES ÉPISODES EL NIÑO
ET LA NIÑA SUR LES CARACTÉRISTIQUES DES DÉBITS JOURNALIERS
EN HIVER ET AU PRINTEMPS AU QUÉBEC MÉRIDIONAL

AVRIL 2019

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon directeur de maîtrise, M. Ali A. Assani, professeur au Département des sciences de l'environnement de l'Université du Québec à Trois-Rivières, de m'avoir offert ce projet de recherche et de m'avoir permis, du fait même, de poursuivre mes études aux cycles supérieurs. Je le remercie aussi pour ses conseils et son support tout au long du projet.

Je remercie également mon codirecteur, M. Christophe Kinnard, professeur au Département des sciences de l'environnement de l'Université du Québec à Trois-Rivières, pour ses conseils, son support et ses suggestions depuis le début du projet.

Finalement, je remercie messieurs Guy Samson, professeur au Département des sciences de l'environnement de l'Université du Québec à Trois-Rivières et Jean-François Quessy, professeur au Département de mathématiques et d'informatique de l'Université du Québec à Trois-Rivières d'avoir accepté de siéger sur mon comité d'orientation et d'évaluer ce travail.

RÉSUMÉ

L'oscillation australe est l'un des phénomènes climatiques causant le plus de variabilité interannuelle au niveau des précipitations et des températures dans le monde. En modifiant les régimes de ces variables hydroclimatiques, ce phénomène a également un impact sur les débits de plusieurs grands cours d'eau à travers le monde. Cela s'observe aussi au Canada. Au Québec, peu d'études se sont intéressées à l'effet des épisodes El Niño et La Niña sur les débits à l'échelle saisonnière. Ces quelques études concluent qu'il n'y a que peu ou pas d'effet, et ce, bien que l'oscillation australe induise bel et bien des anomalies au niveau des précipitations et des températures au Québec. Cela peut s'expliquer par le fait que leurs auteurs ont considéré l'ensemble des épisodes sans distinction selon l'intensité. En effet, dû à l'éloignement du Québec de la côte Ouest sud-américaine, il est probable que seulement l'effet des épisodes de plus forte intensité puisse avoir un impact sur nos cours d'eau. Il est peut-être pertinent d'émettre l'hypothèse que le signal des épisodes de plus forte intensité pourrait être masqué par les épisodes de moindre intensité.

Nous avons donc sélectionné 17 rivières du Québec méridional dont les données de débit sont disponibles depuis 1950 et qui sont peu ou pas affectées par l'activité anthropique. À partir de cet échantillonnage et des données recueillies sur les sites internet du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) et de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), nous avons calculé sept variables hydrologiques qui définissent trois caractéristiques fondamentales des débits pour chacune de ces 17 rivières, et ce, tant à l'hiver qu'au printemps. Pour quantifier l'intensité des épisodes El Niño et La Niña, nous avons utilisé l'Oceanic Niño Index (ONI). Nous avons par la suite classé les épisodes El Niño et La Niña selon leur intensité. Dans un premier temps, nous avons testé la relation entre l'indice ONI et les sept variables hydrologiques pour l'ensemble des années grâce à des analyses de corrélation simple pour chacune des rivières et toujours pour les deux saisons. Ensuite, nous avons répété cette analyse en utilisant seulement les épisodes El Niño et La Niña séparément. Finalement, nous avons discriminé les épisodes de faible intensité.

À la lumière des résultats obtenus, il est démontré un lien entre les épisodes El Niño et La Niña de forte intensité et les débits printaniers et hivernaux au Québec méridional. C'est avec les épisodes El Niño qu'on obtient les meilleurs résultats. La méthode classique, qui ne distingue pas les phases de l'oscillation australe ou encore leur intensité, masque donc plus l'effet des épisodes El Niño que l'effet des épisodes La Niña. Lors des épisodes El Niño, on note une hausse des magnitudes moyennes, maximales et minimales en plus de la variabilité des débits tant à l'hiver qu'au printemps. On observe aussi que les débits maximums surviennent plus tard à l'hiver et plus tôt au printemps. Quant aux débits minimums, ceux-ci sont plus hâtifs à l'hiver et plus tardifs au printemps. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que les épisodes El Niño provoquent des hivers plus chauds et plus pluvieux. Pour les épisodes La Niña, les effets se concentrent au printemps. La magnitude des débits moyens et minimums augmente alors que la variabilité diminue. Cela pourrait s'expliquer par des hivers plus froids et plus neigeux.

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---|-------------|
| REMERCIEMENTS | ii |
| RÉSUMÉ..... | iii |
| LISTE DES TABLEAUX..... | viii |
| LISTE DES FIGURES | xiii |
| CHAPITRE I | |
| PRÉSENTATION DU PROJET..... | 1 |
| 1.1 Mise en contexte..... | 1 |
| 1.2 État des connaissances..... | 3 |
| 1.2.1 Origine de l'oscillation australe | 3 |
| 1.2.2 Effets de l'OA sur les variables hydroclimatiques..... | 7 |
| 1.2.3 Effets de l'oscillation australe sur les débits..... | 15 |
| 1.2.4 Effets de l'oscillation australe au Québec..... | 20 |
| 1.2.5 Variabilité spatiale de l'intensité de la relation entre les épisodes de l'OA et les variables hydroclimatiques..... | 22 |
| 1.3 Problématique..... | 25 |
| 1.4 Objectifs et hypothèses..... | 27 |
| CHAPITRE II | |
| MÉTHODOLOGIE | 29 |
| 2.1 Justification du choix des rivières à l'étude..... | 29 |
| 2.2 Constitution des séries statistiques des débits | 31 |
| 2.2.1 Définition des variables hydrologiques liées à la caractéristique magnitude..... | 32 |
| 2.2.2 Définition des variables hydrologiques liées à la période d'occurrence. | 33 |
| 2.2.3 Définition des variables hydrologiques liées à la caractéristique variabilité de l'écoulement..... | 33 |
| 2.3 Constitution des séries statistiques de l'oscillation australe (OA)..... | 33 |
| 2.4 Séries des épisodes El Niño et La Niña..... | 35 |
| 2.4.1 Série complète..... | 35 |

| | | |
|-------|--|----|
| 2.4.2 | Séries de l'ensemble des épisodes El Niño et La Niña en fonction de différentes intensités | 35 |
| 2.4.3 | Séries des épisodes d'El Niño et La Niña les plus intenses | 36 |
| 2.5 | Analyses statistiques | 37 |

CHAPITRE III

COMPARAISON DE L'INFLUENCE DES INDICES OCÉANIQUES NIÑO SUR LES CARACTÉRISTIQUES DES DÉBITS EN HIVER ET AU PRINTEMPS

38

| | | |
|-----|---|----|
| 3.1 | Relation entre les débits moyens journaliers saisonniers et les indices océaniques Niño..... | 38 |
| 3.2 | Relation entre les débits maximums journaliers saisonniers et les indices océaniques Niño..... | 39 |
| 3.3 | Relation entre les périodes d'occurrence des débits maximums journaliers saisonniers et les indices océaniques Niño | 41 |
| 3.4 | Relation entre les débits minimums journaliers saisonniers et les indices océaniques Niño..... | 42 |
| 3.5 | Relation entre les périodes d'occurrence des débits minimums journaliers saisonniers et les indices océaniques Niño | 43 |
| 3.6 | Relation entre les indices de variabilité de l'écoulement et les indices océaniques Niño..... | 45 |

CHAPITRE IV

COMPARAISON DE L'INFLUENCE DE L'INTENSITÉ DES ÉPISODES EL NIÑO SUR LES CARACTÉRISTIQUES DES DÉBITS EN HIVER ET AU PRINTEMPS

48

| | | |
|-------|--|----|
| 4.1 | Analyse de l'influence des épisodes El Niño d'intensité faible à très forte | 48 |
| 4.1.1 | Relation entre les débits moyens journaliers saisonniers et les épisodes d'El Niño d'intensité faible à très forte..... | 48 |
| 4.1.2 | Relation entre les débits maximums journaliers saisonniers et les épisodes d'El Niño d'intensité faible à très forte | 51 |
| 4.1.3 | Relation entre les périodes d'occurrence des débits maximums journaliers saisonniers et les épisodes d'El Niño d'intensité faible à très forte | 54 |
| 4.1.4 | Relation entre les débits minimums journaliers saisonniers et les épisodes d'El Niño d'intensité faible à très forte | 57 |
| 4.1.5 | Relation entre les débits minimums journaliers saisonniers et les épisodes d'El Niño d'intensité faible à très forte | 60 |
| 4.1.6 | Relation entre les indices de la variabilité de l'écoulement et les épisodes d'El Niño d'intensité faible à très forte | 63 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.2 | Analyse de l'influence des épisodes El Niño d'intensité modérée à très forte... | 67 |
| 4.2.1 | Relation entre les débits moyens journaliers et les épisodes El Niño d'intensité modérée à très forte | 67 |
| 4.2.2 | Relation entre les débits maximums journaliers et les épisodes El Niño d'intensité modérée à très forte | 71 |
| 4.2.3 | Relation entre les périodes d'occurrence des débits maximums journaliers et les épisodes El Niño d'intensité modérée à très forte | 74 |
| 4.2.4 | Relation entre les débits minimums journaliers et les épisodes El Niño d'intensité modérée à très forte | 76 |
| 4.2.5 | Relation entre les périodes d'occurrence des débits minimums journaliers et les épisodes El Niño d'intensité modérée à très forte | 79 |
| 4.2.6 | Relation entre les indices de la variabilité d'écoulement et les épisodes El Niño d'intensité modérée à très forte | 82 |

CHAPITRE V

COMPARAISON DE L'INFLUENCE DE L'INTENSITÉ DES ÉPISODES DE LA NIÑA SUR LES CARACTÉRISTIQUES DES DÉBITS JOURNALIERS EN HIVER ET AU PRINTEMPS..... 87

| | | |
|-------|--|-----|
| 5.1 | Analyse de l'influence des épisodes de La Niña d'intensité faible à forte | 87 |
| 5.1.1 | Relation entre les débits moyens journaliers saisonniers et les épisodes de La Niña d'intensité faible à forte..... | 87 |
| 5.1.2 | Relation entre les débits maximums journaliers saisonniers et les épisodes de La Niña d'intensité faible à forte | 88 |
| 5.1.3 | Relation entre les périodes d'occurrence des débits maximums journaliers saisonniers et les épisodes de La Niña d'intensité faible à forte | 90 |
| 5.1.4 | Relation entre les débits minimums journaliers saisonniers et les épisodes de La Niña d'intensité faible à forte | 92 |
| 5.1.5 | Relation entre les périodes d'occurrence des débits minimums journaliers saisonniers et les épisodes de La Niña d'intensité faible à forte | 93 |
| 5.1.6 | Relation entre les indices de variabilité de l'écoulement et les épisodes de La Niña d'intensité faible à forte..... | 96 |
| 5.2 | Analyse de l'influence des épisodes de La Niña d'intensité modérée à forte | 100 |
| 5.2.1 | Relation entre les débits moyens journaliers saisonniers et les épisodes de La Niña d'intensité modérée à forte | 100 |
| 5.2.2 | Relation entre les débits maximums journaliers saisonniers et les épisodes de La Niña d'intensité modérée à forte..... | 102 |

| | | |
|---|--|------------|
| 5.2.3 | Relation entre les périodes d'occurrence des débits maximums journaliers saisonniers et les épisodes de La Niña d'intensité modérée à forte | 103 |
| 5.2.4 | Relation entre les débits minimums journaliers saisonniers et les épisodes de La Niña d'intensité modérée à forte..... | 106 |
| 5.2.5 | Relation entre la période d'occurrence des débits minimums journaliers saisonniers et les épisodes de La Niña d'intensité modérée à forte | 109 |
| 5.2.6 | Relation entre les indices de la variabilité de l'écoulement et les épisodes de La Niña d'intensité modérée à forte..... | 111 |
| CHAPITRE VI | | |
| SYNTHÈSE DES RÉSULTATS ET DISCUSSION | | 116 |
| 6.1 | Comparaison des séries..... | 117 |
| 6.2 | Comparaison de l'influence de degrés d'intensité des épisodes El Niño et La Niña | 118 |
| 6.3 | Comparaison de l'influence des épisodes El Niño et La Niña en fonction des indices saisonniers d'ONI et des caractéristiques des débits journaliers..... | 120 |
| 6.4 | Influence des saisons | 123 |
| 6.5 | Influence des régions hydroclimatiques | 123 |
| 6.6 | Analyse de la nature de l'influence des épisodes El Niño et La Niña sur les caractéristiques des débits journaliers | 126 |
| CHAPITRE VII | | |
| CONCLUSION..... | | 131 |
| BIBLIOGRAPHIE | | 134 |

LISTE DES TABLEAUX

| Tableau | Page |
|---|------|
| 1.1 Effet d'El Niño sur les précipitations mondiales..... | 9 |
| 1.2 Effet d'El Niño sur les températures mondiales..... | 12 |
| 1.3 Analyse de corrélation entre les indices climatiques et les débits annuels canadiens (Coulibaly et Burn, 2004)..... | 24 |
| 2.1 Rivières à l'étude | 30 |
| 2.2 Classification des épisodes El Niño et La Niña en fonction de leur intensité.. | 36 |
| 2.3 Nombre d'épisodes par séries de 1950 à 2017 | 37 |
| 3.1 Coefficients de corrélation calculés entre les débits moyens journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices océaniques Niño pendant la période 1950-2017 | 39 |
| 3.2 Coefficients de corrélation calculés entre les débits maximums journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices océaniques Niño pendant la période 1950-2017 | 40 |
| 3.3 Coefficients de corrélation calculés entre les périodes d'occurrence des débits maximums journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices océaniques Niño pendant la période 1950-2017 | 42 |
| 3.4 Coefficients de corrélation calculés entre les débits minimums journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices océaniques Niño pendant la période 1950-2017 | 43 |
| 3.5 Coefficients de corrélation calculés entre les périodes d'occurrence des débits minimums journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices océaniques Niño pendant la période 1950-2017 | 44 |
| 3.6 Coefficients de corrélation calculés entre les coefficients de variation saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices océaniques Niño pendant la période 1950-2017 | 46 |
| 3.7 Coefficients de corrélation calculés entre les coefficients d'immodération saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices océaniques Niño pendant la période 1950-2017 | 47 |

| | | |
|------|--|----|
| 4.1 | Coefficients de corrélation calculés entre les débits moyens journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices des épisodes El Niño d'intensité faible à très forte pendant la période 1950-2017 | 49 |
| 4.2 | Coefficients de corrélation calculés entre les débits maximums journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices des épisodes El Niño d'intensité faible à très forte pendant la période 1950-2017 | 52 |
| 4.3 | Coefficients de corrélation calculés entre les périodes d'occurrence des débits maximums journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices des épisodes El Niño d'intensité faible à très forte pendant la période 1950-2017..... | 55 |
| 4.4 | Coefficients de corrélation calculés entre les débits minimums journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices des épisodes El Niño d'intensité faible à très forte pendant la période 1950-2017 | 58 |
| 4.5 | Coefficients de corrélation calculés entre les périodes d'occurrence des débits minimums journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices des épisodes El Niño d'intensité faible à très forte pendant la période 1950-2017 | 61 |
| 4.6 | Coefficients de corrélation calculés entre les coefficients de variation saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices des épisodes El Niño d'intensité faible à très forte pendant la période 1950-2017 | 64 |
| 4.7 | Coefficients de corrélation calculés entre les coefficients d'immodération saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices des épisodes El Niño d'intensité faible à très forte pendant la période 1950-2017 | 66 |
| 4.8 | Coefficients de corrélation calculés les débits moyens journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les épisodes El Niño d'intensité modérée à très forte pendant la période 1950-2017..... | 69 |
| 4.9 | Coefficients de corrélation calculés les débits maximums journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les épisodes El Niño d'intensité modérée à très forte pendant la période 1950-2017 | 72 |
| 4.10 | Coefficients de corrélation calculés de la période d'occurrence des débits maximums journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les épisodes El Niño d'intensité modérée à très forte pendant la période 1950-2017 | 75 |
| 4.11 | Coefficients de corrélation calculés entre les débits minimums journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les épisodes El Niño d'intensité modérée à très forte pendant la période 1950-2017 | 77 |

| | | |
|------|--|-----|
| 4.12 | Coefficients de corrélation calculés entre les périodes d'occurrence des débits minimums journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les épisodes El Niño d'intensité modérée à très forte pendant la période 1950-2017..... | 80 |
| 4.13 | Coefficients de corrélation calculés entre les coefficients de variation saisonniers (hivernaux et printaniers) et les épisodes d'El Niño d'intensité modérée à très forte | 83 |
| 4.14 | Coefficients de corrélation calculés entre les coefficients d'immodération saisonniers (hivernaux et printaniers) et les épisodes d'El Niño d'intensité modérée à très forte | 85 |
| 5.1 | Coefficients de corrélation calculés entre les débits moyens journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices des épisodes La Niña d'intensité faible à forte pendant la période 1950-2017..... | 88 |
| 5.2 | Coefficients de corrélation calculés entre les débits maximums journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices des épisodes La Niña d'intensité faible à forte pendant la période 1950-2017..... | 89 |
| 5.3 | Coefficients de corrélation calculés entre les périodes d'occurrence des débits maximums journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices des épisodes La Niña d'intensité faible à forte pendant la période 1950-2017..... | 91 |
| 5.4 | Coefficients de corrélation calculés entre les débits minimums journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices des épisodes La Niña d'intensité faible à forte pendant la période 1950-2017..... | 93 |
| 5.5 | Coefficients de corrélation calculés entre les périodes d'occurrence des débits minimums journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices des épisodes La Niña d'intensité faible à forte pendant la période 1950-2017..... | 94 |
| 5.6 | Coefficients de corrélation calculés entre les coefficients de variation saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices des épisodes La Niña d'intensité faible à forte pendant la période 1950-2017..... | 97 |
| 5.7 | Coefficients de corrélation calculés entre les coefficients d'immodération saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices des épisodes La Niña d'intensité faible à forte pendant la période 1950-2017..... | 99 |
| 5.8 | Coefficients de corrélation calculés entre les débits moyens journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices des épisodes La Niña d'intensité modérée à forte pendant la période 1950-2017 | 101 |

| | | |
|------|---|-----|
| 5.9 | Coefficients de corrélation calculés entre les débits maximums journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices des épisodes La Niña d'intensité modérée à forte pendant la période 1950-2017 | 103 |
| 5.10 | Coefficients de corrélation calculés entre les périodes d'occurrence des débits maximums journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices des épisodes La Niña d'intensité modérée à forte pendant la période 1950-2017..... | 104 |
| 5.11 | Coefficients de corrélation calculés entre les débits minimums journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices des épisodes La Niña d'intensité modérée à forte pendant la période 1950-2017 | 107 |
| 5.12 | Coefficients de corrélation calculés entre les périodes d'occurrence des débits minimums journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices des épisodes La Niña d'intensité modérée à forte pendant la période 1950-2017..... | 110 |
| 5.13 | Coefficients de corrélation calculés entre les coefficients de variation saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices des épisodes La Niña d'intensité modérée à forte pendant la période 1950-2017 | 112 |
| 5.14 | Coefficients de corrélation calculés entre les coefficients d'immodération saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices des épisodes La Niña d'intensité modérée à forte pendant la période 1950-2017 | 114 |
| 6.1 | Pourcentage (%) des rivières significativement corrélées en fonction des séries des indices ONI pendant la période 1950-2017 | 117 |
| 6.2 | Pourcentage (%) de rivières significativement corrélées selon le degré d'intensité des épisodes El Niño pendant la période 1950-2017..... | 119 |
| 6.3 | Pourcentage de rivières significativement corrélées (%) en fonction de degré d'intensité des épisodes La Niña pendant la période 1950-2017 ($\alpha = 0.1$) | 119 |
| 6.4 | Pourcentage (%) de rivières significativement corrélées aux épisodes El Niño en hiver pendant la période 1950-2017..... | 121 |
| 6.5 | Pourcentage (%) de rivières significativement corrélées aux épisodes El Niño au printemps pendant la période 1950-2017 ($\alpha = 0.1$)..... | 121 |
| 6.6 | Pourcentage (%) de rivières significativement corrélées aux épisodes La Niña en hiver pendant la période 1950-2017 | 122 |
| 6.7 | Pourcentage (%) de rivières significativement corrélées aux épisodes La Niña au printemps pendant la période 1950-2017 ($\alpha = 0.1$) | 122 |

| | | |
|------|---|-----|
| 6.8 | Pourcentage de rivières significativement corrélées (%) par saison pendant la période 1950-2017 ($\alpha = 0.1$)..... | 123 |
| 6.9 | Comparaison des pourcentages des coefficients de corrélation significatifs entre les trois régions hydroclimatiques lors des hivers El Niño pendant la période 1950-2017..... | 124 |
| 6.10 | Comparaison des pourcentages des coefficients de corrélation significatifs entre les régions hydroclimatiques lors des printemps El Niño pendant la période 1950-2017..... | 125 |
| 6.11 | Comparaison des pourcentages des coefficients de corrélation significatifs entre les régions hydroclimatiques lors des hivers La Niña pendant la période 1950-2017 ($\alpha = 0.1$)..... | 125 |
| 6.12 | Comparaison des pourcentages des coefficients de corrélation significatifs entre les trois régions hydroclimatiques lors des printemps La Niña pendant la période 1950-2017 ($\alpha = 0.1$)..... | 126 |
| 6.13 | Comparaison des pourcentages (%) des valeurs positives et négatives des coefficients de corrélation calculés entre les épisodes El Niño et les caractéristiques des débits journaliers pendant la période 1950-2017 | 127 |
| 6.14 | Comparaison des pourcentages (%) des valeurs positives et négatives des coefficients de corrélation calculés entre les épisodes La Niña et les caractéristiques des débits journaliers pendant la période 1950-2017 | 128 |

LISTE DES FIGURES

| Figure | Page |
|--|------|
| 1.1 Cellule de Walker en période normale (NOAA, 2014)..... | 4 |
| 1.2 Cellule de Walker en période El Niño (NOAA, 2014) | 4 |
| 1.3 Cellule de Walker en période La Niña (NOAA, 2014)..... | 5 |
| 1.4 Anomalie de température des océans en période El Niño (décembre 1997) (NOAA, 2014)..... | 5 |
| 1.5 Anomalie de température des océans en période La Niña (décembre 1988) (NOAA, 2014)..... | 6 |
| 1.6 Représentation des effets d'El Niño sur les régimes de précipitation mondiaux (Ropelewski et Halpert, 1987)..... | 7 |
| 1.7 Représentation des effets d'El Niño sur les températures à travers le monde (Halpert et Ropelewski, 1992)..... | 11 |
| 1.8 Distribution des anomalies de températures moyennes (janvier-mars) pour l'Ouest canadien (Shabbar, 1996) | 13 |
| 1.9 Anomalies de température hivernale au Canada en période El Niño (1951-2000) (Shabbar, 1996) | 14 |
| 1.10 Anomalies de précipitation hivernale en mm/jour au Canada en période El Niño (1951-2000) | 15 |
| 1.11 Pourcentage d'anomalie de la magnitude du débit maximum médian entre les années El Niño (a) et La Niña (b) et l'ensemble des années (Ward et al., 2014)..... | 17 |
| 1.12 Distribution spatiale des coefficients de corrélation entre SOI DJF et les anomalies de précipitation DJF au Canada (Shabbar et al., 1997) | 23 |
| 2.1 Localisation des rivières..... | 31 |
| 4.1 Relation entre la magnitude des débits moyens journaliers hivernaux et l'indice ONI lors des épisodes El Niño d'intensité faible à très forte pour la période 1950-2017..... | 50 |

| | | |
|------|--|----|
| 4.2 | Relation entre la magnitude des débits moyens journaliers printaniers et l'indice ONI lors des épisodes El Niño d'intensité faible à très forte pour la période 1950-2017 | 51 |
| 4.3 | Relation entre la magnitude des débits maximums journaliers hivernaux et l'indice ONI lors des épisodes El Niño d'intensité faible à très forte pour la période 1950-2017 | 53 |
| 4.4 | Relation entre la magnitude des débits maximums journaliers printaniers et l'indice ONI lors des épisodes El Niño d'intensité faible à très forte pour la période 1950-2017 | 54 |
| 4.5 | Relation entre la période d'occurrence des débits maximums journaliers hivernaux et l'indice ONI lors des épisodes El Niño d'intensité faible à très forte pour la période 1950-2017 | 56 |
| 4.6 | Relation entre la période d'occurrence des débits maximums journaliers printaniers et l'indice ONI lors des épisodes El Niño d'intensité faible à très forte pour la période 1950-2017 | 57 |
| 4.7 | Relation entre la magnitude des débits minimums journaliers hivernaux et l'indice ONI lors des épisodes El Niño d'intensité faible à très forte pour la période 1950-2017 | 59 |
| 4.8 | Relation entre la magnitude des débits minimums journaliers printaniers et l'indice ONI lors des épisodes El Niño d'intensité faible à très forte pour la période 1950-2017 | 60 |
| 4.9 | Relation entre la période d'occurrence des débits minimums journaliers hivernaux et l'indice ONI lors des épisodes El Niño d'intensité faible à très forte pour la période 1950-2017 | 62 |
| 4.10 | Relation entre la période d'occurrence des débits minimums journaliers printaniers et l'indice ONI lors des épisodes El Niño d'intensité faible à très forte pour la période 1950-2017 | 62 |
| 4.11 | Relation entre les coefficients de variation hivernaux et l'indice ONI lors des épisodes El Niño d'intensité faible à très forte pour la période 1950-2017 | 65 |
| 4.12 | Relation entre les coefficients de variation printaniers et l'indice ONI lors des épisodes El Niño d'intensité faible à très forte pour la période 1950-2017 | 65 |
| 4.13 | Relation entre les coefficients d'immodération hivernaux et l'indice ONI lors des épisodes El Niño d'intensité faible à très forte pour la période 1950-2017 | 67 |

| | | |
|------|---|----|
| 4.14 | Relation entre la magnitude des débits moyens journaliers hivernaux et l'indice ONI lors des épisodes El Niño d'intensité modérée à très forte pour la période 1950-2017 | 70 |
| 4.15 | Relation entre la magnitude des débits moyens journaliers printaniers et l'indice ONI lors des épisodes El Niño d'intensité modérée à très forte pour la période 1950-2017 | 71 |
| 4.16 | Relation entre la magnitude des débits maximums journaliers hivernaux et l'indice ONI lors des épisodes El Niño d'intensité modérée à très forte pour la période 1950-2017 | 73 |
| 4.17 | Relation entre la magnitude des débits maximums journaliers printaniers et l'indice ONI lors des épisodes El Niño d'intensité modérée à très forte pour la période 1950-2017 | 74 |
| 4.18 | Relation entre la période d'occurrence des débits maximums journaliers hivernaux et l'indice ONI lors des épisodes El Niño d'intensité modérée à très forte pour la période 1950-2017 | 76 |
| 4.19 | Relation entre la magnitude des débits minimums journaliers hivernaux et l'indice ONI lors des épisodes El Niño d'intensité modérée à très forte pour la période 1950-2017 | 78 |
| 4.20 | Relation entre la magnitude des débits minimums journaliers printaniers et l'indice ONI lors des épisodes El Niño d'intensité modérée à très forte pour la période 1950-2017 | 78 |
| 4.21 | Relation entre la période d'occurrence des débits minimums journaliers hivernaux et l'indice ONI lors des épisodes El Niño d'intensité modérée à très forte pour la période 1950-2017 | 81 |
| 4.22 | Relation entre la période d'occurrence des débits minimums journaliers printaniers et l'indice ONI lors des épisodes El Niño d'intensité modérée à très forte pour la période 1950-2017 | 81 |
| 4.23 | Relation entre les coefficients de variation printaniers et l'indice ONI lors des épisodes El Niño d'intensité modérée à très forte pour la période 1950-2017 | 84 |
| 4.24 | Relation entre les coefficients d'immodération printaniers et l'indice ONI lors des épisodes El Niño d'intensité modérée à très forte pour la période 1950-2017 | 86 |
| 5.1 | Relation entre la magnitude des débits maximums journaliers hivernaux et l'indice ONI lors des épisodes La Niña d'intensité faible à forte pour la période 1950-2017 | 90 |

| | | |
|------|---|-----|
| 5.2 | Relation entre la période d'occurrence des débits maximums journaliers hivernaux et l'indice ONI lors des épisodes La Niña d'intensité faible à forte pour la période 1950-2017 | 92 |
| 5.3 | Relation entre la période d'occurrence des débits minimums journaliers hivernaux et l'indice ONI lors des épisodes La Niña d'intensité faible à forte pour la période 1950-2017 | 95 |
| 5.4 | Relation entre la période d'occurrence des débits minimums journaliers printaniers et l'indice ONI lors des épisodes La Niña d'intensité faible à forte pour la période 1950-2017 | 95 |
| 5.5 | Relation entre les coefficients de variation hivernaux et l'indice ONI lors des épisodes La Niña d'intensité faible à forte pour la période 1950-2017 | 98 |
| 5.6 | Relation entre les coefficients de variation printaniers et l'indice ONI lors des épisodes La Niña d'intensité faible à forte pour la période 1950-2017 | 98 |
| 5.7 | Relation entre les coefficients d'immodération hivernaux et l'indice ONI lors des épisodes La Niña d'intensité faible à forte pour la période 1950-2017 | 100 |
| 5.8 | Relation entre la magnitude des débits moyens journaliers printaniers et l'indice ONI lors des épisodes La Niña d'intensité modérée à forte pour la période 1950-2017 | 102 |
| 5.9 | Relation entre la période d'occurrence des débits maximums journaliers hivernaux et l'indice ONI lors des épisodes La Niña d'intensité modérée et forte pour la période 1950-2017 | 105 |
| 5.10 | Relation entre la période d'occurrence des débits maximums journaliers printaniers et l'indice ONI lors des épisodes La Niña d'intensité modérée et forte pour la période 1950-2017 | 106 |
| 5.11 | Relation entre la magnitude des débits minimums journaliers hivernaux et l'indice ONI lors des épisodes La Niña d'intensité modérée et forte pour la période 1950-2017 | 108 |
| 5.12 | Relation entre la magnitude des débits minimums journaliers printaniers et l'indice ONI lors des épisodes La Niña d'intensité modérée et forte pour la période 1950-2017 | 108 |
| 5.13 | Relation entre la période d'occurrence des débits minimums journaliers printaniers et l'indice ONI lors des épisodes La Niña d'intensité modérée et forte pour la période 1950-2017 | 111 |
| 5.14 | Relation entre les coefficients de variation printaniers et l'indice ONI lors des épisodes La Niña d'intensité modérée et forte pour la période 1950-2017 | 113 |

| | | |
|------|--|-----|
| 5.15 | Relation entre les coefficients d'immodération hivernaux et l'indice ONI lors des épisodes La Niña d'intensité modérée et forte pour la période 1950-2017..... | 115 |
| 5.16 | Relation entre les coefficients d'immodération printaniers et l'indice ONI lors des épisodes La Niña d'intensité modérée et forte pour la période 1950-2017..... | 115 |
| 6.1 | Schéma conceptuel de l'influence des épisodes d'El Niño sur les caractéristiques des débits en hiver et au printemps au Québec..... | 129 |
| 6.2 | Schéma conceptuel de l'influence des épisodes de La Niña sur les caractéristiques des débits en hiver et au printemps au Québec..... | 130 |

CHAPITRE I

PRÉSENTATION DU PROJET

1.1 Mise en contexte

Dans le contexte actuel de réchauffement climatique, notamment attribuable à la hausse des gaz à effet de serre d'origine anthropique, il faut s'attendre à une augmentation de la température des eaux océaniques. À l'échelle mondiale, une hausse de 0,6 °C à 2,0 °C des 100 premiers mètres de la colonne d'eau des océans au cours du XXI^e siècle est prévue (GIEC, 2013). Environ les deux tiers de la superficie de la terre étant recouverts par les océans, leur réchauffement entraînera des impacts majeurs sur la planète, dont la hausse du niveau moyen des mers et l'augmentation de la quantité de CO₂ dans l'atmosphère. En effet, lorsque les océans se réchauffent, leur capacité à absorber les gaz à effet de serre diminue. Cela engendrera donc une augmentation du CO₂ atmosphérique, une accumulation qui amplifiera le réchauffement planétaire par effet de rétroaction positive.

Néanmoins, la hausse de température des océans, parfois importante, est un phénomène bien connu qui survient périodiquement dans certaines régions du monde, indépendamment de la hausse de la concentration de CO₂ d'origine anthropique. Le réchauffement des eaux océaniques le plus reconnu est celui qui survient épisodiquement dans le bassin Pacifique tropical dans l'Hémisphère Sud. En effet, dans cette région, les eaux chaudes de l'océan Pacifique accumulées en Asie et en Océanie migrent périodiquement vers les côtes occidentales de l'Amérique du Sud. Ce phénomène a lieu aux 2 à 7 ans. Ce courant chaud, baptisé El Niño (l'Enfant) en raison de son avènement en décembre, provoque des bouleversements climatiques, hydrologiques et écologiques profonds en Amérique du Sud. Sur le plan hydroclimatique, ces bouleversements se traduisent par des pluies diluviennes et des températures plus élevées que la moyenne climatique, provoquant souvent des inondations exceptionnelles.

En revanche, en Asie et en Océanie, la migration des eaux chaudes vers l'Est entraîne des épisodes de sécheresse et des étiages très sévères (Kovats et al., 1999).

Les changements soudains dans les régimes de précipitations et des températures associés à El Niño peuvent engendrer de nombreux impacts au niveau de la santé humaine. Par exemple, cet événement climatique est associé à une hausse des cas de maladie transmise par le biais des moustiques, comme la malaria ou la dengue, et à de nombreux autres problèmes de santé (Kovats et al., 1999). Ces auteurs notent qu'on observe une hausse de plus du tiers des cas de malaria en Colombie et au Venezuela. On note aussi une augmentation des cas de cette même maladie au sud-ouest du Sri Lanka et au nord du Pakistan, au niveau de l'Himalaya, notamment. El Niño est aussi associé à de nombreux cas de problèmes respiratoires qui ont été observés en Malaisie, en Indonésie et au Brésil lors de l'épisode de 1997-1998. Il est aussi lié à des périodes de famines et des crises alimentaires puisqu'il est associé à des périodes de sécheresse, notamment dans certaines régions de l'Asie et de l'Afrique (Kovats et al., 1999).

El Niño peut aussi représenter une perturbation écologique. En plus des nombreux feux de forêt et des sécheresses qu'il provoque, la masse d'eaux chaudes sur la côte Ouest sud-américaine bloque momentanément la remontée des eaux froides riches en nutriments. Cela a pour effet de réduire la production de plancton et affecte l'ensemble de la chaîne trophique qui en dépend, tant pour les populations de poissons que d'oiseaux (Kovats et al., 1999; Trenberth, 1997).

Jusqu'au milieu du siècle dernier, on pensait que les impacts de ce courant marin chaud épisodique se limitaient exclusivement à ces deux régions du globe directement touchées par ce phénomène océano-atmosphérique. Les études effectuées plus tard ont démontré leurs impacts dans des régions de plus en plus éloignées de la région de naissance d'El Niño. Depuis plus d'une trentaine d'années, *El Niño – Southern Oscillation* (ENSO), aussi appelé l'oscillation australe (OA) est connu comme l'un des principaux facteurs de la variabilité climatique à l'échelle de toute la planète (p. ex., Bonsal et Shabbar, 2010; Dubeau, 2014; Guay et al., 1999; Kovats et al., 1999; Shabbar, 2006;

Trenberth et Stepaniak, 2001; Xu et Zhang, 2007). Cette reconnaissance découle des conclusions des études qui ont établi un lien entre El Niño et des variables hydroclimatiques (précipitation, température, vent, débit, etc.) dans de nombreuses régions du globe.

1.2 État des connaissances

1.2.1 Origine de l'oscillation australe

El Niño et La Niña sont respectivement les phases chaude et froide de l'oscillation australe (OA) (NOAA, 2016). C'est l'une des principales sources de variabilité interannuelle climatique dans le monde (Bonsal et Shabbar, 2010; Dubeau, 2014; Guay et al., 1999; Merle et Hisard, 1990; Shabbar, 2006; Trenberth et Stepaniak, 2001; Trenberth, 1997; Xu et Zhang, 2007). Il provient de l'effet couplé de l'atmosphère et de l'océan. L'oscillation australe est un phénomène climatique quasi cyclique qui naît dans le Pacifique Sud, près de la côte Ouest sud-américaine. Sa récurrence n'est pas fixe: un épisode d'El Niño ou de La Niña se produit tous les 2 à 7 ans (Bonsal et Shabbar, 2010; NOAA, 2016).

L'OA est une téléconnexion climatique résultant d'un changement de l'intensité des vents alizés (Clarke, 2008; Merle et Hisard, 1990). La variation de l'intensité de ces vents est associée à la cellule de Walker, c'est-à-dire une boucle convective qu'on retrouve au niveau du Pacifique équatorial (Bjerknes, 1969; Lau et Yang, 2002; Wang, Deser, et Yu, 2012). Cette cellule est imagée à la figure 1.1. Bjerknes explique que cette cellule redistribue l'excédent d'énergie au niveau de l'équateur vers la haute troposphère. En temps normal, elle pousse la chaleur latente du Pacifique Ouest vers le Pacifique Central puis la soulève dans la haute troposphère où elle se refroidira. Cette chaleur latente en moins, l'air de la côte Ouest sud-américaine est plus froid et sec. En période El Niño, cette cellule se déplace vers l'est et la force des alizés faiblit (Figure 1.2). La chaleur s'accumule dans le Pacifique Ouest, près de la côte péruvienne, et réchauffe les eaux de surface. En période La Niña, les alizés gagnent en intensité, la cellule de Walker est

poussée plus loin vers l'ouest (Figure 1.3) et il en résulte des eaux de surface encore plus froides (Lau et Yang, 2002).

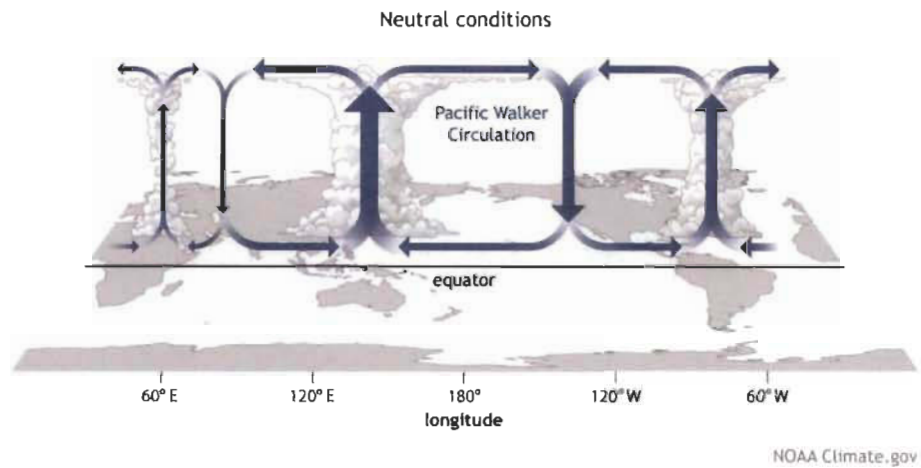


Figure 1.1 Cellule de Walker en période normale (NOAA, 2014).

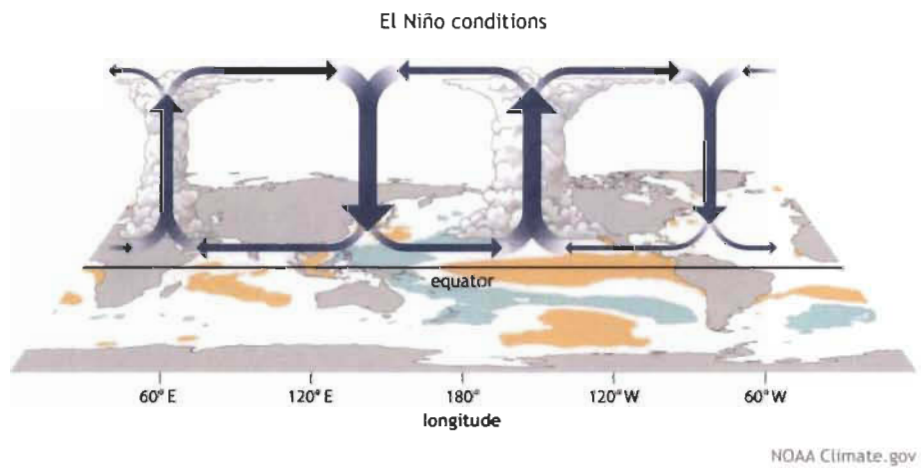


Figure 1.2 Cellule de Walker en période El Niño (NOAA, 2014).

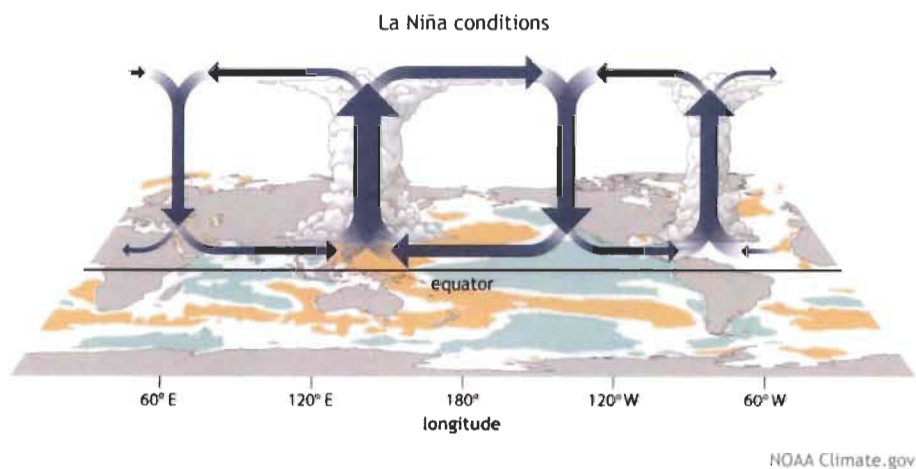


Figure 1.3 Cellule de Walker en période La Niña (NOAA, 2014).

Une phase El Niño est caractérisée par une anomalie de température de surface de l'est du Pacifique équatorial de $+0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, alors qu'il s'agit, pour La Niña, d'une anomalie de $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ par rapport à la moyenne climatique sur 30 ans (NCEI, 2016). En temps normal, ces vents soufflant d'est en ouest poussent une énorme quantité d'eau chaude et d'air humide provenant de la côte Ouest sud-américaine vers l'Océanie. Il se forme une remontée d'eau froide riche en nutriments le long de la côte sud-américaine (Clarke, 2008).

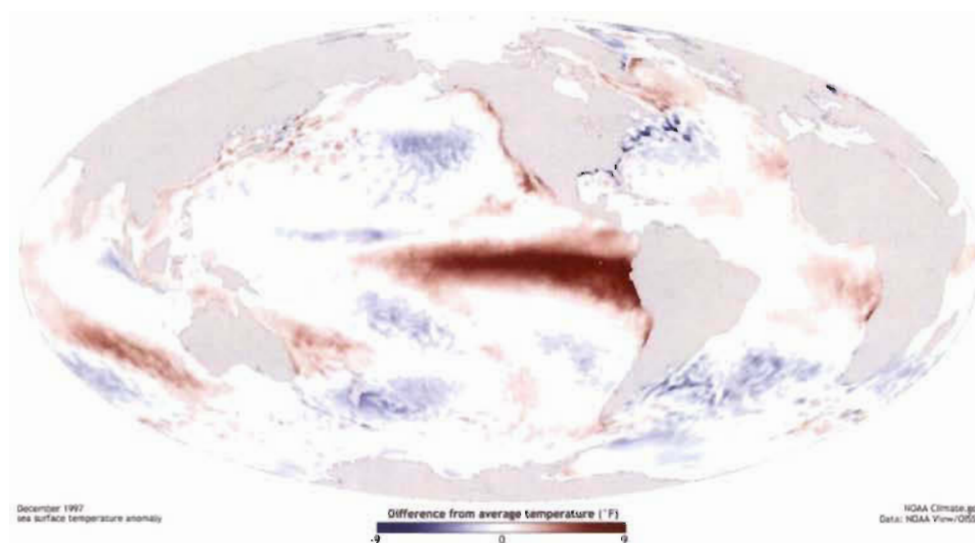


Figure 1.4 Anomalie de température des océans en période El Niño (décembre 1997) (NOAA, 2014).

La figure 1.4 illustre les anomalies de température de surface des océans induites par El Niño en décembre 1997. Lorsque les alizées faiblissent, l'eau chaude et l'air humide demeurent près de la côte, réchauffant ainsi les eaux de surface et empêchant la remontée d'eau froide riche en nutriments. La thermocline à l'est du Pacifique central remonte alors plus près de la surface (Zelle et al., 2004) et le niveau de l'eau est légèrement plus bas dans le Pacifique Ouest, provoquant une migration des eaux chaudes d'ouest en est. L'avancée d'eau plus chaude que la normale dans le Pacifique, le long de l'équateur, peut dépasser le quart de la circonférence de la Terre (Clarke, 2008). Cette anomalie chaude est nommée El Niño.

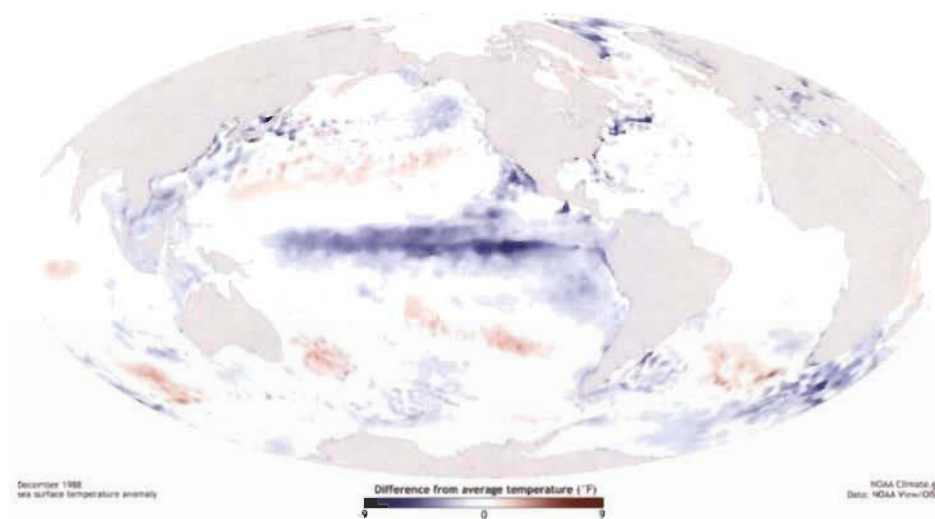


Figure 1.5 Anomalie de température des océans en période La Niña (décembre 1988) (NOAA, 2014).

La figure 1.5 montre les anomalies de température observées dans l'océan Pacifique en décembre 1988, en épisode La Niña. Cette phase froide de l'oscillation australe est provoquée par la mécanique inverse: lorsque les alizées gagnent en intensité, ils poussent l'eau chaude et l'humidité vers l'Océanie encore plus loin qu'à l'habitude. La remontée d'eau froide peut donc se faire et s'accroître, refroidissant ainsi l'eau de surface près de la côte Ouest sud-américaine. Cette eau refroidie est accompagnée d'air froid et sec. Le niveau de l'eau au niveau de la côte péruvienne augmente, créant un courant marin qui transporte l'eau froide vers l'Ouest (Clarke, 2008).

1.2.2 Effets de l'OA sur les variables hydroclimatiques

1.2.2.1 Précipitations

Ropelewski et Halpert (1987 et 1989) ont étudié la relation entre les phénomènes El Niño/ La Niña et les précipitations à l'échelle de la planète. Dans l'article publié en 1987, ceux-ci s'intéressent plus particulièrement à l'effet des épisodes El Niño sur les régimes de précipitations. Quant à l'étude publiée en 1989, c'est à la phase froide de l'OA, c'est-à-dire La Niña, qu'ils s'intéressent. À partir de mesures de précipitations mensuelles remontant parfois jusqu'à 1875 provenant de 1700 stations à travers le monde, ils ont démontré que les épisodes El Niño modifient bel et bien le régime des précipitations de plusieurs régions du monde. Puis, ils se sont intéressés à la spatialisation de ces anomalies de précipitations. Ainsi, ils ont délimité 19 régions montrant une certaine homogénéité au niveau de l'effet qu'El Niño produit sur leur régime de précipitations. Les résultats sont exposés au tableau 1.1 avec leur niveau de cohérence. Celui-ci est un indicateur d'homogénéité de la réponse à l'intérieur même de la région. Lorsqu'il est élevé, les stations d'observation de la région réagissent dans le même sens à chacun des épisodes observés (Ropelewski et Halpert, 1986). Parmi l'ensemble des régions, sept connaissent une hausse de leurs précipitations lors d'un épisode El Niño.

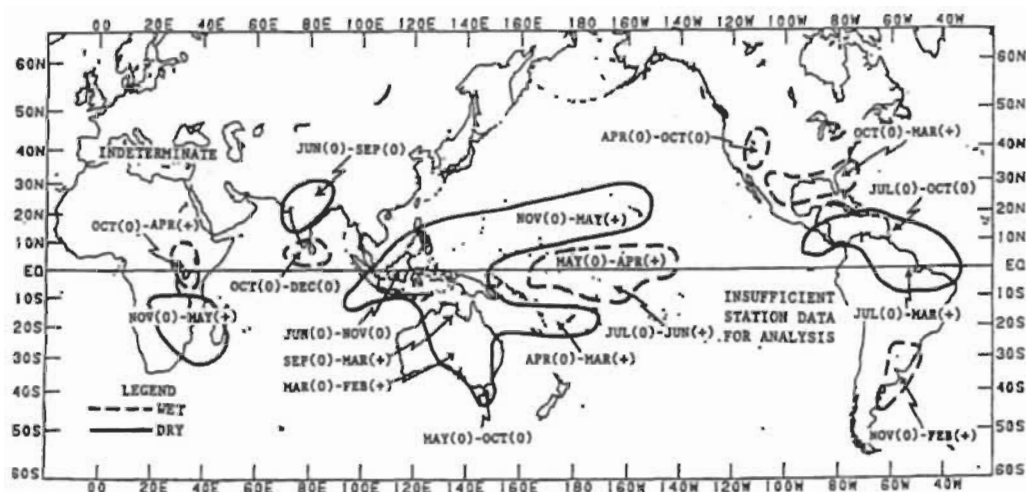


Figure 1.6 Représentation des effets d'El Niño sur les régimes de précipitation mondiaux (Ropelewski et Halpert, 1987).

La figure 1.6, tirée de l'article de Ropelewski et Halpert, 1987, présente la répartition des effets d'El Niño sur les régimes de précipitation mensuelle à travers le monde selon les 19 régions montrant une réponse homogène. Les périodes associées à chaque région sont celles auxquelles l'anomalie se mesure. Par exemple, si l'on considère un épisode de l'année 1982, SEP(0) – MAR(+) représente la période de septembre 1982 jusqu'à mars 1983. Si la région est délimitée avec un trait discontinu, El Niño induit une hausse des précipitations, alors qu'un trait continu signifie une diminution. On observe d'abord que les zones affectées se concentrent principalement près de l'Équateur. Les relations entre El Niño et les précipitations trouvées aux latitudes les plus éloignées de l'Équateur sont toutes dans l'Hémisphère Sud. D'abord, pour le secteur du bassin du Pacifique, deux régions montrent une réponse positive, le Pacifique central et le sud du Pacifique central, les quatre autres montrant une réponse négative. Ensuite, dans le secteur de l'Australie, les précipitations des quatre régions diminuent en période El Niño. Pour le sous-continent indien, celles de l'Inde diminuent alors qu'à Minicoy – Sri Lanka, légèrement au Sud, elles augmentent. La région de l'est de l'Afrique équatoriale montre une réponse positive, alors que pour celle plus au sud, on note une diminution. En ce qui concerne l'Amérique du Sud, les précipitations diminuent au nord-est alors que l'inverse se produit au sud-est. En Amérique centrale, elles tendent à diminuer. Finalement, on observe une hausse des précipitations dans les deux régions de l'Amérique du Nord. Pour celles couvrant une partie de l'est du continent, c'est-à-dire le Golfe et Nord du Mexique, cette hausse des précipitations s'observe pendant la saison froide (Ropelewski et Halpert, 1987).

Tableau 1.1
Effet d'El Niño sur les précipitations mondiales

| Régions | Effet sur les précipitations* | Cohérence** |
|----------------------------------|-------------------------------|-------------|
| Bassin du Pacifique | | |
| Pacifique central | (+) | 0,98 |
| Sud du Pacifique central | (+) | 0,88 |
| Indonésie-Nouvelle Guinée | (-) | 0,82 |
| Fiji-Nouvelle Calédonie | (-) | 0,95 |
| Micronésie - Pacifique Ouest | (-) | 0,91 |
| Hawaïi | (-) | 0,88 |
| Australie | | |
| Nord de l'Australie | (-) | 0,95 |
| Est de l'Australie | (-) | 0,89 |
| Sud de l'Australie – Tasmanie | (-) | 0,94 |
| Centre de l'Australie | (-) | 0,86 |
| Sous-continent indien | | |
| Inde | (-) | 0,86 |
| Minicoy - Sri Lanka | (+) | 0,92 |
| Afrique tropicale et méridionale | | |
| Est de l'Afrique équatoriale | (+) | 0,93 |
| Sud de l'Afrique | (-) | 0,90 |
| Amérique du Sud | | |
| Nord-Est de l'Amérique du Sud | (-) | 0,91 |
| Sud-Est de l'Amérique du Sud | (+) | 0,82 |
| Amérique centrale | | |
| Caraïbe américaine centrale | (-) | 0,77 |
| Amérique du Nord | | |
| Grand bassin des États-Unis | (+) | 0,80 |
| Golfe et Nord du Mexique | (+) | 0,93 |

Issu des résultats de Ropelewski et Halpert, 1987.

* Lorsque (+), El Niño induit une hausse des précipitations.

** La cohérence est un indicateur d'homogénéité de la réponse à l'événement à l'intérieur de la région. Lorsque celle-ci est élevée, la réponse est homogène entre les stations (Ropelewski et Halpert, 1986).

Le tableau 1.1 expose le type de lien entre El Niño et les précipitations pour les 19 régions ainsi que leur niveau de cohérence. C'est en Amérique centrale qu'on note le

plus d'hétérogénéité au niveau des réponses entre les stations. Puisque le niveau de cohérence de cette région se situe sous 0,80, les auteurs ont jugé les résultats non significatifs. Les régions avec les réponses les plus homogènes se retrouvent principalement au centre et à l'ouest du Pacifique équatorial.

Puis, le cas de La Niña est analysé dans l'article paru en 1989. Des 19 régions utilisées précédemment, 15 montrent que La Niña induit des anomalies au niveau des précipitations. Dans chacune de ces régions, les effets de cette phase froide de l'OA sur les précipitations sont opposés à ceux de la phase chaude. Ils s'observent généralement à la même période, à plus ou moins un mois de décalage. Finalement, pour 13 régions, les effets des deux phases de l'OA surviennent à la même période de l'année, soit la période d'octobre à décembre (Ropelewski et Halpert, 1989).

1.2.2.2 Températures

Avec une méthodologie similaire à celle utilisée dans l'analyse de la relation entre les précipitations et le cycle de l'OA, Halpert et Ropelewski (1992) ont étudié l'effet de ce même phénomène climatique sur les températures de surface, tant au niveau des continents que des océans. Ils mettent d'abord en lumière qu'El Niño et La Niña affectent les températures de plusieurs régions du monde. Cette fois, ils ont délimité 12 régions démontrant des réponses significatives et homogènes aux variations de la phase chaude de l'oscillation australe.

Tableau 1.2

Effet d'El Niño sur les températures mondiales

| Régions | Effet sur les températures* | Cohérence** |
|---|-----------------------------|-------------|
| Amérique du Nord/du Sud | | |
| Amérique centrale – Caraïbes | (+) | 0,96 |
| Centre de l'Amérique du Sud | (+) | 0,93 |
| Côte Ouest sud-américaine | (+) | 0,94 |
| Est du Canada | (+) | 0,93 |
| Nord-Ouest de l'Amérique du Nord | (+) | 0,93 |
| Sud-Est des États-Unis | (-) | 0,94 |
| Asie | | |
| Sud-Est asiatique – Inde | (+) | 0,92 |
| Japon | (+) | 0,65 |
| Afrique – Australie | | |
| Sud-Est de l'Afrique | (+) | 0,88 |
| Centre de l'Australie | (+) | 0,87 |
| Nord de l'Australie (décembre (0) – juin (+)) | (+) | 0,89 |
| Nord de l'Australie (mai (0) – octobre (0)) | (-) | 0,89 |
| Sud centre – Ouest du Pacifique | (-) | 0,92 |

Issu des résultats de Halpert et Ropelewski, 1992.

* Lorsque (+), El Niño induit une hausse des températures.

** La cohérence est un indicateur d'homogénéité de la réponse à l'événement à l'intérieur de la région. Lorsque celle-ci est élevée, la réponse est homogène entre les stations (Ropelewski et Halpert, 1986).

Les résultats sont résumés au tableau 1.2. Encore une fois, les niveaux de cohérence sont élevés, jusqu'à 0,96, sauf pour la région du Japon qui est jugée non significative puisqu'elle y est inférieure à 0,80 (0,65). Notons que treize régions sont montrées, le nord de l'Australie étant représenté deux fois : ce secteur montre deux réponses homogènes selon la saison. Aussi, des douze régions, neuf connaissent une hausse de leur température. Notons que les effets d'El Niño sur les températures pour les trois régions de l'Amérique du Nord, c'est-à-dire l'est du Canada, le nord-ouest de l'Amérique du Nord et le sud-est des États-Unis, s'observent en saison froide. Les deux régions en plus haute latitude de l'Amérique du Nord voient leur température augmenter pendant la saison froide.

Quant à La Niña, onze régions montrent des relations significatives, seulement l'est du Canada ne l'est pas. Les réponses de la phase chaude de dix des régions étudiées sont opposées à celles de la phase froide (Halpert et Ropelewski, 1992).

1.2.2.3 *Au Canada*

L'oscillation australe affecte aussi le Canada, notamment au niveau des températures, des précipitations et de la force des vents (Bonsal et Shabbar, 2010; Guay et al., 1999). C'est à la saison froide que le lien le plus fort entre le climat canadien et les téléconnexions, comme l'OA, est observé (Bonsal et Shabbar, 2010; Shabbar et Khandekar, 1996). L'OA serait en fait le phénomène causant le plus de variabilité interannuelle du climat à l'hiver au Canada (Bonsal et Shabbar, 2010; Shabbar, 2006).

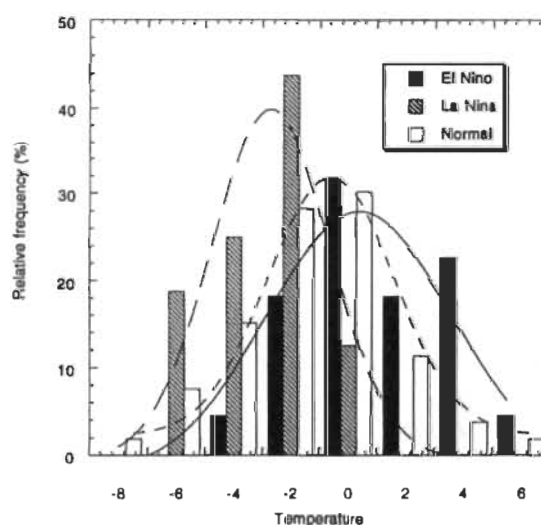


Figure 1.8 Distribution des anomalies de températures moyennes (janvier-mars) pour l'Ouest canadien (Shabbar, 1996).

La figure 1.8, issue de Shabbar (1996), illustre la distribution des anomalies de températures moyennes entre janvier et mars enregistrées pour une période allant de 1900 à 1990 dans l'ouest du Canada. Cette période regroupe 23 épisodes El Niño représentés en noir uni et 17 épisodes La Niña représentés par des barres rayées. Les années « normales » sont présentées en blanc. Une courbe gaussienne est appliquée à chacune des distributions. Les auteurs concluent que les moyennes des distributions des phases

chaudes et froides sont significativement différentes des années normales. De plus, El Niño induit des hivers plus chauds alors que La Niña, des hivers plus froids.

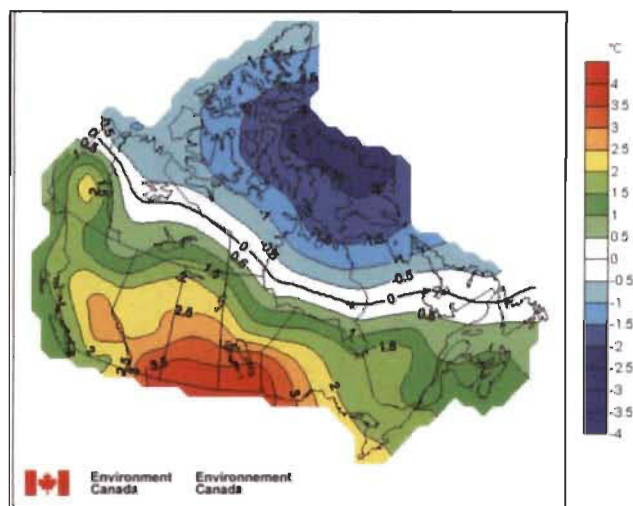


Figure 1.9 Anomalies de température hivernale au Canada en période El Niño (1951-2000) (Shabbar, 1996).

La figure 1.9, issue de l'étude de Shabbar sur les effets de l'OA sur le climat canadien réalisée en 2006, illustre comment El Niño affecte les températures hivernales au Canada. Sur la plus grande superficie du pays, El Niño provoque une augmentation des températures. C'est dans le centre du Canada, plus particulièrement au sud, que l'oscillation australe provoque le plus grand réchauffement, allant jusqu'à +3,5 °C. Cet effet s'atténue vers le nord. Les anomalies de température de l'Ouest canadien sont similaires à celles de l'est du Canada. Au Nord du pays, le courant-jet polaire conserve l'air froid de l'Arctique vers le nord-est du Canada, causant des températures plus froides que la normale pour cette période (Shabbar, 2006). Dans le cas de La Niña, celle-ci cause une diminution des températures hivernales (Bonsal et Shabbar, 2010; Guay et al., 1999; Shabbar et Khandekar, 1996; Shabbar, 2006), mais cette anomalie négative s'observe principalement dans l'Ouest et le centre du pays (Shabbar et Khandekar, 1996).

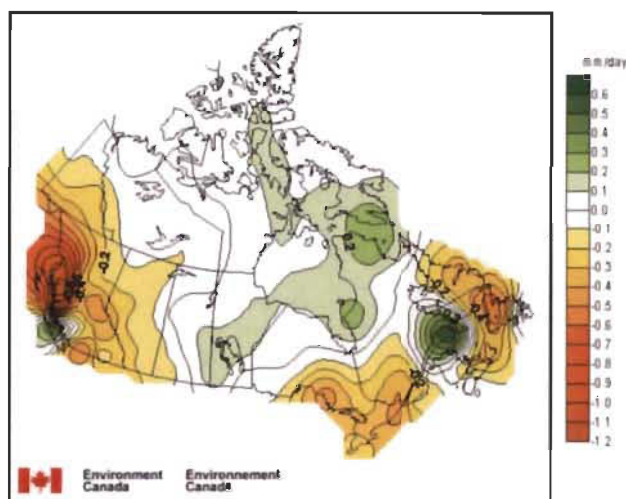


Figure 1.10 Anomalies de précipitation hivernale en mm/jour au Canada en période El Niño (1951-2000).

Au niveau des précipitations, El Niño est associé à une diminution significative des précipitations hivernales. La figure 1.10 provient aussi de l'étude de Shabbar réalisée en 2006. On y observe les effets d'un épisode chaud de l'OA sur les précipitations de décembre à février au Canada. Les anomalies ne sont pas uniformes au pays, plusieurs patrons se distinguent. Les précipitations tendent à diminuer pour une grande partie de l'ouest du pays, dans le sud de l'Ontario, le sud-ouest du Québec et l'extrême est du pays. Le centre du Canada est moins influencé, mais les précipitations tendent tout de même à diminuer. On observe deux importants centres où les précipitations augmentent grandement : l'île de Vancouver et le golfe du Saint-Laurent. Somme toute, le sud du Canada est principalement plus sec en hiver pendant un épisode El Niño que pendant un hiver normal (Bonsal et Shabbar, 2008; Shabbar, 2006).

1.2.3 Effets de l'oscillation australe sur les débits

1.2.3.1 À travers le monde

En modifiant le régime des précipitations et de températures dans le monde, l'oscillation australe fait aussi varier la dynamique hydrologique des rivières à travers le monde. Ward et ses collaborateurs ont mené de vastes études sur l'effet de l'OA sur les

débits de plusieurs rivières à travers le monde. La première est parue en 2010 et traite de l'effet de cette téléconnexion sur les débits extrêmes journaliers sur la période de 1921 à 1980. Dans cette étude, les auteurs concluent que l'OA a un impact significatif sur les débits extrêmes et moyens de nombreux cours d'eau à travers le monde. De plus, les corrélations mises en lumière sont plus fortes avec les débits maximums que les débits moyens, particulièrement pour les régions à l'extérieur des tropiques (Ward et al., 2010).

Pour faire suite à cette étude, ils ont publié en 2014 un article traitant de la sensibilité à l'oscillation australe des débits maximums et moyens annuels de rivière, à l'échelle mondiale, sur la période de 1958 à 2000. Pour cette étude, les débits utilisés sont simulés à partir du modèle *WaterGAP*. D'abord, ils identifient une influence significative de l'OA sur les débits des rivières sur plus du tiers des surfaces continentales, excluant l'Antarctique. Puis, ils soulignent que la sensibilité est à son maximum pour les mois d'octobre à février, et qu'elle décline à partir de mars. Dans plus de la moitié des cas, La Niña induit une hausse des débits maximums annuels alors qu'El Niño induit une diminution. Les auteurs soulignent aussi que pour beaucoup de régions, les forces des relations varient dans la période à l'étude. Finalement, la relation observée est plus grande sur les débits maximums que les débits moyens (Ward et al., 2010, 2014).

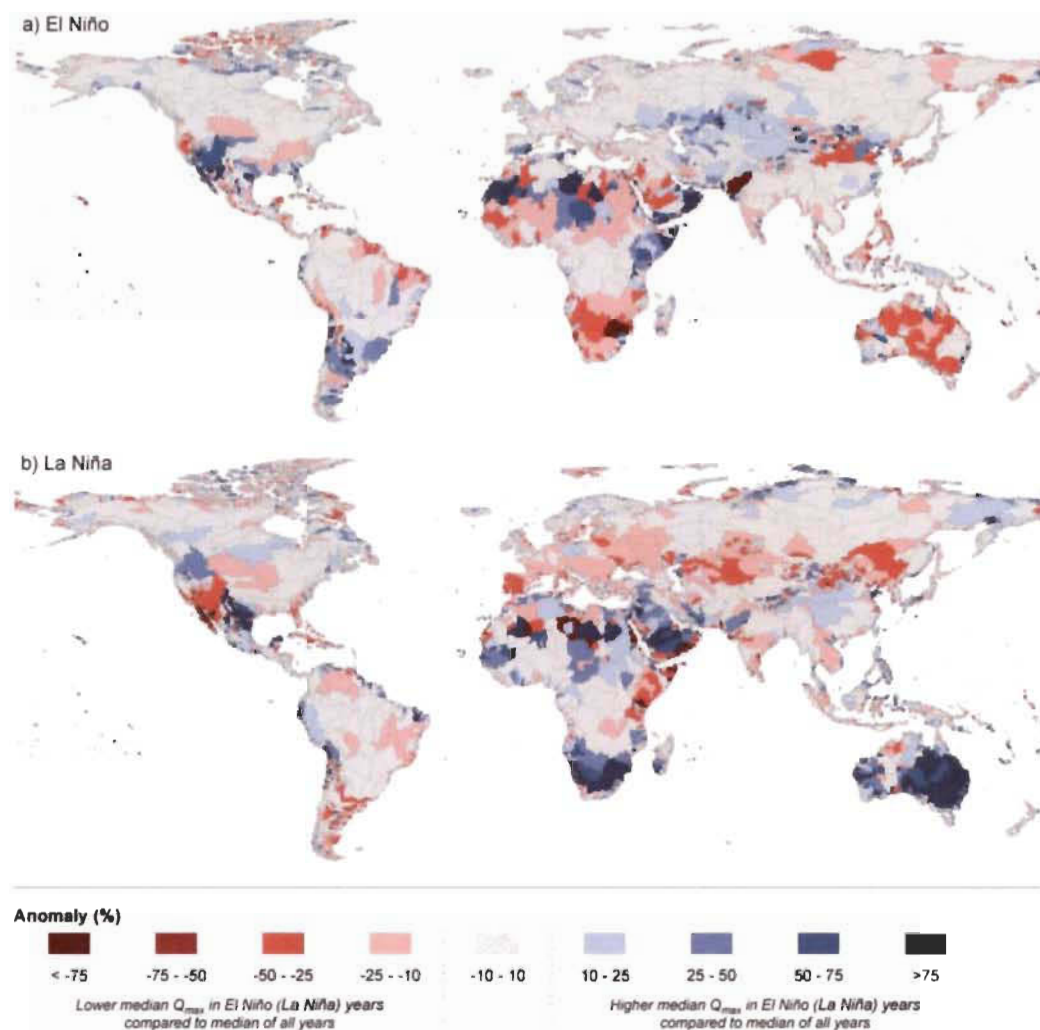


Figure 1.11 Pourcentage d'anomalie de la magnitude du débit maximum médian entre les années El Niño (a) et La Niña (b) et l'ensemble des années (Ward et al., 2014).

La figure 1.11, issue de l'étude de Ward et al. (2014) expose l'anomalie induite par El Niño (a) et La Niña (b) comparativement à l'ensemble des années de la période 1958-2000. Faisant abstraction de l'Antarctique, l'OA influence les débits maximums annuels sur 37 % des surfaces continentales. Sur 23 % des surfaces continentales, la corrélation est positive. Sur les 14 % restant, elle est négative. Encore une fois, les régions autour de l'Équateur sont largement influencées. Au niveau des surfaces identifiées au Québec, El Niño induit une diminution de la magnitude des débits maximums annuels et La Niña, une baisse.

Dans une étude s'intéressant au lien entre des indicateurs de l'oscillation australe, les précipitations et le débit du fleuve Jaune en Chine, les chercheurs ont trouvé que ce phénomène climatique est significativement corrélé aux précipitations et au débit du fleuve Jaune. Les précipitations le sont pour les périodes du mois de janvier, de mars, et de septembre à novembre. Quant aux débits mensuels, ils sont significativement corrélés aux indices de ce phénomène climatique pour trois périodes, soit de janvier à mars, le mois de juin, et d'octobre à décembre. Pour ce fleuve, un épisode El Niño est associé à une diminution de la magnitude du débit pour les périodes de janvier à mars et d'octobre à décembre alors qu'au mois de juin, il est associé à une hausse (Jia et al., 2011). Toujours en Chine, on démontre un lien significatif entre l'OA et le débit du fleuve Yangtze. Lorsque l'intensité d'un épisode El Niño est forte, la magnitude des débits de ce fleuve est plus basse : en situation inverse, lors d'un épisode La Niña puissant, le débit devient plus grand (Wei et al., 2014).

Une multitude de grands cours d'eau ailleurs dans le monde sont aussi affectés par l'oscillation australe. Amarasekera et al. (1997) se sont attardés aux liens entre l'OA et la variabilité des débits des rivières tropicales. Les fleuves Amazone, Congo, Paraná et Nil ont été étudiés. Pour les deux plus grands de ces fleuves, l'Amazone et le Congo, les auteurs ont observé des coefficients de corrélations négatifs entre la magnitude des débits et l'indice d'anomalie de température de surface des océans au niveau du Pacifique Est et Centrale. Cependant, ceux-ci sont relativement faibles. Un épisode El Niño est tout de même associé à une diminution des débits de ces deux grands fleuves. Dans le cas du Nil et du Paraná, l'OA est positivement et fortement corrélée à la magnitude de leur débit. Quant à la variance des débits de l'Amazone et du Congo, l'OA n'en explique qu'environ 10 %. Dans le cas du Paraná et du Nil, l'oscillation australe explique entre 20 et 25 % de la variance de leur débit. (Amarasekera et al., 1997).

Ces études suggèrent donc que les dynamiques hydrologiques de plusieurs grands cours d'eau à travers le monde sont affectées par l'OA. Cependant, l'effet de cette téléconnexion varie dans le temps et dans l'espace en plus de dépendre de certaines caractéristiques des bassins versants, comme la taille dans le cas des fleuves tropicaux.

1.2.3.2 États-Unis

Redmond et Koch (1991) se sont intéressés à l'effet de différentes téléconnexions sur les précipitations, les températures et la variabilité des débits des cours d'eau à l'ouest des États-Unis. Les auteurs identifient d'abord deux secteurs où les effets sont opposés : la région au nord-ouest près du Pacifique et la région désertique au sud-ouest. Les plus fortes relations mises en évidence sont observées durant les mois d'octobre à mars suivant l'épisode. C'est dans la région du nord-ouest que le lien le plus fort est observé. Les auteurs suggèrent que ce serait dû à la combinaison de la hausse des températures et la baisse des précipitations en période El Niño. Cette association diminue le couvert neigeux, qui est un facteur prédominant dans le débit des cours d'eau de cette région. Un épisode El Niño provoquera une diminution dans le nord-ouest et une augmentation des débits des cours d'eau dans le sud-ouest. La Niña, quant à elle, est associée à une réponse inverse, soit une diminution des débits dans le sud-ouest et une augmentation dans le nord-ouest de la région à l'étude (Redmond et Koch, 1991).

1.2.3.3 Canada

Au Canada, des études ont mis en lumière que l'OA affecte bel et bien les cours d'eau (Assel, 1998; Bonsal et Shabbar, 2008; Coulibaly et Burn, 2004; Sellars, Garrett, et Woods, 2008). Par l'analyse de 79 stations hydrométriques réparties à travers le pays sur une période de 1911 à 1999, Coulibaly et Burn (2004) s'intéressent à l'effet de différentes téléconnexions sur les débits canadiens. Ils démontrent que l'indice de l'OA est significativement corrélé aux débits des rivières canadiennes. Selon leurs résultats, un épisode El Niño induit des débits plus faibles pour l'ensemble du Canada.

En 2008, Bonsal et Shabbar se sont intéressés aux études antérieures traitant de l'effet de grandes téléconnexions sur la variabilité des débits minimums au Canada. C'est dans l'ouest du pays que le signal se remarque le plus. Un épisode El Niño fort provoque des événements d'étiage plus fréquents. Cela est associé aux hivers plus chauds causés par la phase chaude de l'OA. Dans le nord du pays, les auteurs soulignent que trop peu d'études ont été menées sur la question et que lorsque des relations sont détectées

entre les débits de cette région et les anomalies climatiques, celles-ci sont plus faibles qu'ailleurs au Canada.

Les variations au niveau des variables hydroclimatiques qu'induisent les cycles de l'oscillation australe peuvent affecter les cours d'eau, notamment par le couvert de glace des Grands Lacs. En effet, durant l'épisode El Niño de l'hiver 1997-1998, considéré particulièrement puissant, le couvert maximum annuel de glace était à son plus bas niveau depuis 35 ans pour chacun des Grands Lacs. Trois des quatre lacs ont atteint un niveau minimum historique (Assel et al., 2000). On attribue cela aux températures automnales et hivernales plus élevées qu'en temps normal et une moindre quantité de précipitations nivales (Assel et al., 2000; Shabbar et Khandekar, 1996). Non seulement cela affecte l'écologie de ces lacs, les activités récréotouristiques et la navigation, mais cela influence aussi les débits des cours d'eau, dont celui du fleuve Saint-Laurent qui prend sa source au lac Ontario. L'absence de glace favorise notamment l'évaporation pendant l'hiver, ce qui induit au printemps des crues plus faibles et des niveaux d'étiage plus bas (Croley, 2003; Lofgren et al., 2002).

1.2.4 Effets de l'oscillation australe au Québec

1.2.4.1 Variables hydroclimatiques

Au Québec, on sait que l'OA peut affecter les régimes de température et de précipitation; les anomalies qu'il induit sont cependant relativement faibles (Anctil et Coulibaly, 2004; Guay et al., 1999). Au niveau des températures, en période El Niño, on note que les températures du sud du Québec tendent à être plus froides à l'automne, mais significativement plus chaudes à l'hiver. Pendant un épisode La Niña, les températures printanières tendent à être plus basses dans le sud et l'est du Québec. Cette tendance est plus significative au niveau du nord-est du Saint-Laurent. La région du nord du Québec est la plus sensible à la phase froide de l'OA, les températures y sont généralement plus froides pendant l'ensemble de l'année (Guay et al., 1999).

Quant aux précipitations, la phase chaude de l'oscillation australe induit normalement des hivers légèrement plus humides, sauf pour les villes de Mont-Joli et de Québec. Dans le Nord québécois, les hivers sont plus humides et les étés plus secs en période El Niño comparativement à La Niña (Guay et al., 1999). Cependant, Dubeau (2014) note une diminution des précipitations hivernales de près de 20 % pour l'épisode El Niño de 2009-2010.

1.2.4.2 Débits

Anctil et Coulibaly se sont intéressés à l'effet de différentes téléconnexions, dont l'OA, sur la variabilité interannuelle des débits des rivières du Québec dans une étude parue en 2004. Au moyen d'une analyse en ondelettes, ils ont déterminé que l'OA est négativement corrélé aux débits de l'est de la province : un épisode El Niño fort induit donc une baisse des débits alors que La Niña induit une hausse. Le lien identifié est toutefois plutôt faible.

Dans l'étude de Dubeau (2014) consacrée aux effets de l'épisode El Niño 2009-2010 au Québec sur les rivières et leurs écosystèmes, l'auteur énonce que cet événement aura causé l'hiver le plus sec jamais enregistré au Canada. En effet, les températures hivernales auraient augmenté de 2 °C comparativement à la normale alors que les précipitations auraient diminué de 20 % lors de cet épisode (Dubeau, 2014). Un épisode El Niño au Québec serait associé à une baisse des débits due à un déficit en précipitations et à des températures plus élevées (Dubeau, 2014; Shabbar, 2006). Quelques études identifient donc un lien entre les débits des rivières au Québec et l'OA (Anctil et Coulibaly, 2004; Bonsal et Shabbar, 2010; Coulibaly et Burn, 2004; Shabbar, 2006).

Récemment, une étude arrive à la conclusion que l'OA influence très peu les débits journaliers hivernaux au Québec (Beauchamp et al., 2015). Son influence est de beaucoup moindre à d'autres téléconnexions comme *North Atlantic Oscillation* (NAO) ou *Pacific Decadal Oscillation* (PDO) malgré que d'autres études avancent que l'oscillation australe

est la principale source de variabilité interannuelle du climat à l'hiver au Canada (Bonsal et Shabbar, 2010; Shabbar, 2006).

Assani et al. (2006) ont comparé l'effet de différents indices climatiques sur la dynamique des rivières québécoises, s'intéressant autant à l'échelle annuelle qu'à l'échelle hivernale et estivale. Cette fois-ci, les auteurs énoncent qu'en été, une phase La Niña induirait une hausse des débits. Cependant, les corrélations mises en lumière sont plus faibles pour l'oscillation australe que pour les autres téléconnexions décrites dans leur étude.

1.2.5 Variabilité spatiale de l'intensité de la relation entre les épisodes de l'OA et les variables hydroclimatiques

Dans leur étude s'intéressant notamment à la régionalisation des effets d'El Niño sur les précipitations dans le monde, Ropelewski et Halpert (1987) soulignent que l'essentiel des régions influencées par les épisodes de l'OA se concentrent autour de l'Équateur. Ils ont aussi observé cette tendance dans l'étude parue en 1992 s'intéressant aux températures. Puis, à l'échelle nord-américaine, Ropelewski et Halpert (1986) ne détectent aucun signal de l'OA sur les précipitations aux hautes latitudes, alors qu'ils détectent de fortes relations dans le sud des États-Unis.

Pour le Canada, Shabbar (2006) observe que dépendamment des régions du Canada, le sens de la corrélation entre les variables hydroclimatiques et l'OA varie. En effet, au niveau des précipitations hivernales, El Niño induit une diminution dans le sud du Québec et de l'Ontario alors qu'il est accompagné d'une augmentation dans le nord du Québec et dans la région du golfe du Saint-Laurent, tel qu'illustré par la figure 1.10.

Au Canada, Bonsal et Shabbar (2008) soulignent que les relations entre les téléconnexions, dont l'OA, et les températures sont normalement plus robustes à l'ouest du pays qu'à l'est. Puis, au niveau des relations avec les débits minimums, ils soulignent que c'est aussi dans l'ouest qu'elles sont les plus fortes. Celles trouvées dans le nord et dans l'est du pays sont plus faibles.

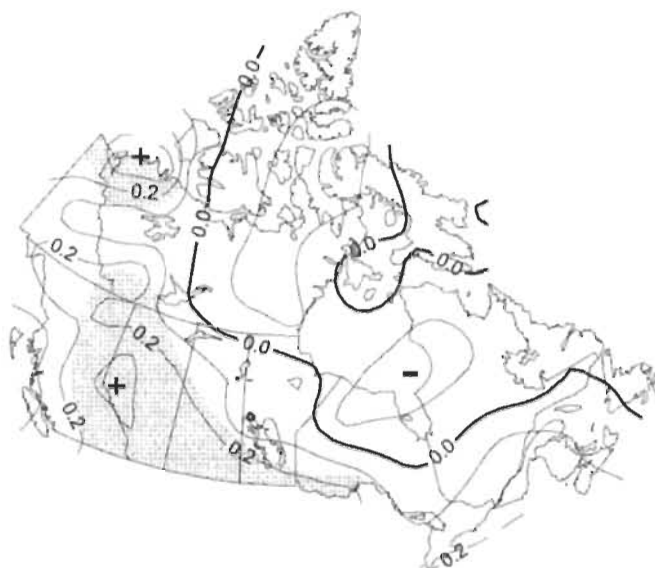


Figure 1.12 Distribution spatiale des coefficients de corrélation entre SOI DJF et les anomalies de précipitation DJF au Canada (Shabbar et al., 1997).

Dans leur étude de 1997 consacrée aux effets de l'oscillation australe sur les patrons de précipitations canadiens, Shabbar et ses collaborateurs ont produit une cartographie représentant la distribution spatiale des coefficients de corrélation entre la valeur de l'indice SOI, un indicateur de l'OA, pour les mois de décembre, janvier et février (SOI DJF) et les précipitations pour les mêmes mois (Figure 1.12). Sur cette figure, les secteurs ombragés dénotent un coefficient de corrélation significatif au seuil de 5 %. On note que le coefficient de corrélation est positif pour la majeure partie du sud du pays, qu'il s'affaiblit pour ensuite devenir négatif au fur et à mesure que les latitudes augmentent. De plus, on note que d'ouest en est, le coefficient de corrélation s'affaiblit. Cela démontre que la relation diffère spatialement et que l'intensité du signal diminue selon les régions. Au niveau des températures, on observe une dynamique similaire: l'intensité du lien est plus forte dans l'Ouest que dans l'est (Shabbar et Khandekar, 1996). Cela suggère que plus on s'éloigne de la zone d'occurrence de l'OA, plus son impact sur les températures et les précipitations s'atténue.

Tableau 1.3

Analyse de corrélation entre les indices climatiques et les débits annuels canadiens
(Coulibaly et Burn, 2004)

| Climate Indices | ≤1950 | ≥1950 | ≤1970 | ≥1970 | 1911–1999* |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|------------|
| <i>West</i> | | | | | |
| ENSO3 | 0.15 | -0.48 | -0.08 | -0.63 | 0.04 |
| NAO | 0.48 | -0.69 | -0.38 | -0.67 | -0.12 |
| NAM | -0.01 | -0.20 | -0.04 | -0.56 | -0.14 |
| PNA | - | -0.59 | -0.62 | -0.64 | -0.56 |
| <i>Central</i> | | | | | |
| ENSO3 | -0.22 | 0.03 | -0.08 | -0.18 | 0.14 |
| NAO | -0.11 | -0.05 | -0.20 | -0.46 | -0.18 |
| NAM | -0.38 | -0.34 | -0.28 | -0.20 | -0.26 |
| PNA | - | 0.01 | 0.75 | -0.35 | 0.01 |
| <i>East</i> | | | | | |
| ENSO3 | 0.04 | -0.66 | -0.08 | -0.70 | -0.17 |
| NAO | 0.36 | -0.73 | 0.20 | -0.79 | 0.14 |
| NAM | -0.18 | -0.26 | -0.21 | -0.19 | -0.20 |
| PNA | - | -0.47 | -0.84 | -0.32 | -0.45 |
| <i>All</i> | | | | | |
| ENSO3 | -0.65 | -0.70 | -0.61 | -0.62 | -0.58 |
| NAO | -0.64 | -0.52 | -0.62 | -0.58 | -0.61 |
| NAM | -0.45 | -0.09 | -0.37 | -0.38 | -0.34 |
| PNA | - | -0.53 | 0.40 | -0.40 | -0.53 |

*Except for the PNA index, where time series are available for 1950–1999.

Au niveau de l'effet de l'oscillation australe sur les débits au Canada, l'intensité du signal varie aussi spatialement. Le tableau 1.3, issu de l'analyse de Coulibaly et Burn (2004), montre les coefficients de corrélations entre les indices climatiques et les débits de 79 rivières canadiennes selon certaines périodes et différents secteurs. On note d'abord que le coefficient de corrélation entre l'indice ENSO3 et les débits pour tout le pays et l'ensemble de la période est de -0,58 alors que, pour la période suivant 1950, il est de -0,70. Pour la période 1950 à 1999, c'est étonnamment dans l'est du pays qu'on a observé le coefficient le plus élevé, soit -0,66 (versus -0,48 pour l'Ouest canadien). Il faut cependant souligner que ces coefficients de corrélation sont issus de la bande spectrale de 3-7 ans d'une analyse à ondelettes. Cette méthode est différente de celle utilisée dans les autres études. Les résultats ne sont pas directement comparables.

Au Québec, les travaux consacrés à l'influence de l'oscillation australe sur la variabilité temporelle des cours d'eau au Québec trouvent des liens faibles ou inexistants

(Anctil et Coulibaly, 2004; Assani et al., 2006; Assani, Charron, et al., 2010; Assani, Landais, et al., 2010; Beauchamp et al., 2015; Coulibaly et Burn, 2004, 2005; Coulibaly et al., 2000). Par exemple, Anctil et Coulibaly (2004) identifient des coefficients de corrélation entre les débits moyens de 18 rivières au Québec et l'OA pour la période de 1938-2000 allant jusqu'à -0,61 dans l'est de la province et jusqu'à -0,42 dans l'ouest.

1.3 Problématique

Les études de Ropelewski et Halpert de 1987, 1989 et 1992 ont démontré que les impacts d'El Niño et La Niña sur les précipitations et sur les températures s'observent un peu partout sur le globe. Bien que leurs effets diffèrent selon les régions, ils s'observent généralement à la même période de l'année, soit à l'hiver et au printemps suivant un épisode. En affectant le régime des précipitations et de température, l'OA est reconnu pour affecter les débits des rivières dans plusieurs régions du monde (Ward et al., 2010, 2014). Ils soulignent que c'est pendant les mois d'octobre à février que son effet est à son maximum.

Les effets de l'oscillation australe se mesurent aussi au Canada et ce serait même le phénomène causant le plus de variabilité interannuelle climatique (Bonsal et Shabbar, 2010; Guay et al., 1999; Shabbar et Khandekar, 1996). Au Québec, on observe aussi des anomalies au niveau des températures et des précipitations, mais celles-ci sont relativement faibles (Anctil et Coulibaly, 2004; Guay et al., 1999).

Puisque l'OA affecte les variables hydroclimatiques au Québec, on doit s'attendre à ce que nos cours d'eau soient aussi influencés. Peu d'études se sont penchées sur les impacts de l'OA sur les rivières au Québec, particulièrement à l'échelle saisonnière. Beauchamp et al. (2015) l'ont fait en 2015 et ont mesuré un effet plus faible sur les débits journaliers hivernaux de l'OA comparativement à d'autres téléconnexions alors que celui-ci est la principale source de variabilité interannuelle climatique pendant la saison hivernale au Canada (Bonsal & Shabbar, 2010; Shabbar, 2006). L'importance de l'influence de l'oscillation australe sur les rivières au Québec est donc encore à définir.

De plus, ces études s'intéressent plutôt à la variabilité interannuelle; elles étudient donc le phénomène à une échelle annuelle plutôt que saisonnière. L'échelle saisonnière permet de distinguer la variation intra annuelle au niveau de l'influence des téléconnexions comme La Niña ou El Niño. Dans leur étude de 2006, Assani et ses collaborateurs s'intéressent notamment à l'effet de différentes téléconnexions sur les débits à une échelle saisonnière. Ils ont mesuré que La Niña influence significativement les débits estivaux, mais les corrélations observées sont plus faibles pour cette phase de l'oscillation australe que pour les autres téléconnexions à l'étude. Les influences de ce phénomène climatique pour la saison hivernale sont cependant plus faibles malgré que ce soit à cette saison que les effets de l'OA seraient les plus ressentis à nos latitudes (Bonsal et Shabbar, 2010; Shabbar et Khandekar, 1996). Il est important de noter que ces études prennent en compte tous les événements de l'OA. Ainsi, elles ne font pas la distinction entre les épisodes plus faibles et les épisodes les plus extrêmes. Le signal des épisodes les plus forts pourrait être brouillé par celui des épisodes les plus faibles et ainsi induire des coefficients de corrélation plus faibles.

Au niveau de la spatialisation des anomalies de précipitations et de températures causées par l'oscillation australe, on note que l'effet faiblit d'ouest en est ou lorsque les latitudes augmentent (Shabbar, Bonsal, & Khandekar, 1997; Shabbar & Khandekar, 1996). Ainsi, plus on s'éloigne de l'Équateur, plus les effets sont difficiles à détecter. L'influence de l'OA faiblit donc avec l'éloignement de sa source.

Au Québec, l'eau recouvre environ 21 % du territoire, tant sous forme de lacs que de rivières. Grâce à cette richesse, le Québec est le troisième producteur mondial d'hydroélectricité (Astrade, 1998). Par le biais d'Hydro-Québec, les rivières ont rapporté pour 2 360 millions de dollars en dividendes à l'État québécois en 2015 (Hydro-Québec, 2015). La recherche au niveau des cours d'eau est donc très importante pour l'économie québécoise. Or, on sait que l'oscillation australe affecte le climat et les cours d'eau du monde entier, mais on connaît très peu son effet sur les cours d'eau du Québec du fait que les études déjà effectuées sur ce sujet n'ont mis en évidence qu'un très faible lien entre les indices de l'OA et les variables hydroclimatiques au Québec comme on l'a déjà mentionné.

1.4 Objectifs et hypothèses

L'objectif principal du projet de recherche est de mesurer les impacts des événements d'El Niño et de La Niña sur les caractéristiques de débits hivernaux et printaniers au Québec méridional en fonction de l'intensité de ces épisodes et, ce contrairement à toutes les études antérieures qui n'en ont jamais tenu compte. L'hypothèse générale qui sous-tend cet objectif est la suivante : l'influence des épisodes El Niño et La Niña sur les débits hivernaux et printaniers ne se manifeste que lors des épisodes de plus forte intensité. Cela serait attribuable à l'éloignement du Québec par rapport à la région source de l'OA, c'est-à-dire la région Pacifique tropicale, qui atténuerait le signal. Il s'ensuit que l'absence ou le faible lien observé entre les épisodes de l'OA et les variables hydroclimatiques au Québec résulte du fait qu'on n'a jamais analysé séparément les événements El Niño et La Niña en fonction de leur intensité respective.

La question générale qui découle de cet objectif est la suivante : existe-t-il au Québec un lien significatif entre les caractéristiques des débits journaliers et l'intensité des épisodes El Niño et La Niña en hiver et au printemps? Cette question générale soulève six autres questions suivantes :

- 1) En cas d'existence de ce lien, l'influence de l'intensité des épisodes sur les caractéristiques des débits est-elle la même pour El Niño et pour La Niña?
- 2) Quelle est la nature de l'influence des épisodes El Niño et La Niña?
- 3) Quelles sont les caractéristiques des débits qui sont les plus influencées par l'intensité des épisodes d'El Niño et de La Niña au Québec méridional?
- 4) Quelle est la saison où cette influence se manifeste le plus au Québec méridional?
- 5) Quel(s) est (sont) le(s) indice(s) saisonnier(s) des épisodes El Niño et La Niña qui a (ont) une forte influence sur les caractéristiques des débits en hiver et au printemps au Québec méridional?

- 6) L'influence de l'intensité des épisodes El Niño et La Niña est-elle spatialement homogène à l'échelle de tout le Québec méridional?

CHAPITRE II

MÉTHODOLOGIE

2.1 Justification du choix des rivières à l'étude

Le choix des rivières a été effectué en fonction de la disponibilité des données de débit dans l'optique de maximiser la fenêtre temporelle de l'étude. De plus, les rivières sélectionnées devaient être très peu ou pas influencées par les activités anthropiques. Ainsi, 17 rivières du Québec méridional dont les données de débits sont disponibles pour la période de 1950 à 2017 ont été sélectionnées. Les débits journaliers proviennent du site web du Centre d'Expertise Hydrique du Québec (CEHQ, https://www.cehq.gouv.qc.ca/hydrometrie/historique_donnees/index.asp). Le tableau 2.1 présente les rivières à l'étude et la figure 2.1 montre leur localisation. Celles-ci sont regroupées en trois régions hydroclimatiques homogènes (Assani et al., 2010; Assani et al., 2010) : Est, Sud-Est et Sud-Ouest.

Tableau 2.1
Rivières à l'étude

| Code | Rivière | Superficie (km ²) | Latitude (N) | Longitude (W) |
|--|---------------------|-------------------------------|--------------|---------------|
| <i>Région hydroclimatique de l'Est</i> | | | | |
| E1 | Blanche | 208 | 48°46' | 67°39' |
| E2 | Du Loup | 1050 | 47°49' | 69°31' |
| E3 | Matane | 826 | 48°46' | 67°32' |
| E4 | Ouelle | 802 | 47°25' | 69°56' |
| E5 | Rimouski | 1610 | 48°24' | 68°33' |
| E6 | Trois-Pistoles | 932 | 48°05' | 69°11' |
| <i>Région hydroclimatique du Sud-Est</i> | | | | |
| SE1 | Beaurivage | 709 | 46°39' | 71°17' |
| SE2 | Châteauguay | 2500 | 45°17' | 73°48' |
| SE3 | Du Sud | 826 | 46°49' | -70°45' |
| SE4 | Eaton | 642 | 45°28' | -71°39' |
| SE5 | Etchemin | 1130 | 46°38' | -71°02' |
| SE6 | Nicolet Sud-Ouest | 544 | 45°47' | -71°58' |
| <i>Région hydroclimatique du Sud-Ouest</i> | | | | |
| SW1 | De la Petite Nation | 1330 | 45°47' | -75°05' |
| SW2 | Du Nord | 1170 | 45°47' | -74°00' |
| SW3 | L'Assomption | 1340 | 46°00' | -73°25' |
| SW4 | Matawin | 1390 | 46°41' | -73°54' |
| SW5 | Vermillon | 2670 | 47°39' | -72°57' |

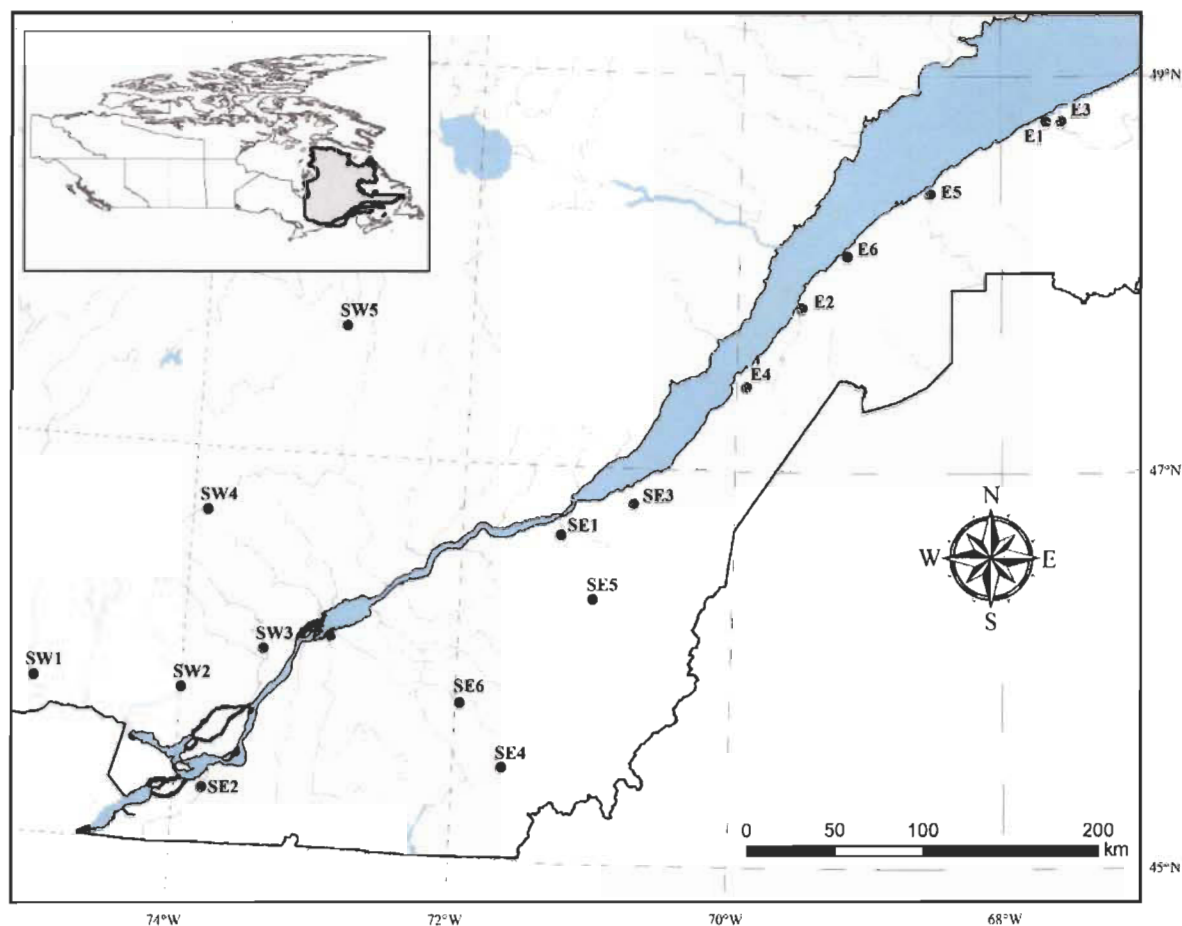


Figure 2.1 Localisation des rivières.

La région hydroclimatique de l'Est est située en rive sud du fleuve Saint-Laurent au nord du 47°N. Elle est caractérisée par un climat tempéré maritime. Localisée au sud de ce parallèle en rive sud aussi, la région hydroclimatique du Sud-Est est caractérisée par un climat mixte (maritime et continental). Enfin, la région hydroclimatique du Sud-Ouest est située en rive nord. Son climat est de type tempéré continental. (Assani et al., 2010; Assani et al., 2010).

2.2 Constitution des séries statistiques des débits

À partir des débits journaliers, plusieurs séries des variables hydrologiques qui définissent les caractéristiques fondamentales des débits ont été constituées pour chaque rivière. Comme mentionné précédemment, l'influence des épisodes El Niño et La Niña se

manifeste principalement en hiver et au printemps au Québec. On s'est donc limité à l'analyse des séries saisonnières hivernales (de janvier à mars) et printanières (d'avril à juin). Pour chacune de ces deux saisons et pour chaque rivière, on a constitué sept variables hydrologiques qui définissent trois caractéristiques fondamentales des débits. Rappelons que selon le concept du « régime des débits naturels », les débits d'une rivière peuvent être définis par cinq caractéristiques ou composantes fondamentales suivantes : la magnitude ou volume d'écoulement, la durée, la fréquence, la période d'occurrence et la variabilité (Poff et al. 1997). Cependant, le nombre de caractéristiques à définir dépend de l'échelle d'analyse et du type de débits (Assani et al. 2010). Chaque caractéristique fondamentale est définie par des variables hydrologiques dont le nombre varie d'une caractéristique à une autre (Assani et al. 2010). Sur la base de ces considérations, on a donc défini trois caractéristiques fondamentales suivantes : magnitude, période d'occurrence et variabilité. Chacune de ces caractéristiques a été définie par au moins deux variables hydrologiques.

2.2.1 Définition des variables hydrologiques liées à la caractéristique magnitude

La caractéristique magnitude a été définie par trois variables hydrologiques suivantes :

- Les débits moyens journaliers (Q_m) sont la moyenne des débits journaliers mesurés au cours d'une saison. En hiver, c'est la moyenne des débits journaliers mesurés de janvier à mars de chaque année de 1950 à 2017, et au printemps, c'est la moyenne des débits journaliers mesurés d'avril à juin de chaque année de 1950 à 2017.
- Le débit maximum journalier saisonnier (Q_{max}) est la valeur du débit le plus élevé mesuré en hiver ou au printemps de chaque année.
- Le débit minimum journalier saisonnier (Q_{min}) est la valeur du débit le plus bas mesuré en hiver ou au printemps de chaque année.

2.2.2 Définition des variables hydrologiques liées à la période d'occurrence

On a calculé les dates d'occurrence des débits maximums (POmax) et minimums (POmin) en hiver et au printemps. Ces dates calendaires ont été converties en jours juliens.

2.2.3 Définition des variables hydrologiques liées à la caractéristique variabilité de l'écoulement

La caractéristique variabilité de l'écoulement a été définie par deux indices hydrologiques suivants :

- Le coefficient de variation (CV) mesure la variabilité des débits d'un jour à l'autre durant une saison. Il s'agit tout simplement du quotient entre l'écart-type et la moyenne des débits journaliers de la saison considérée. Il s'exprime en pourcentage.

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \times 100 \quad (1)$$

- Le coefficient d'immodération (CI) mesure l'amplitude maximale de la variabilité des débits durant la saison considérée. Il s'agit du quotient entre le débit maximum (Qmax) et le débit minimum (Qmin) journaliers.

$$CI = \frac{Q_{max}}{Q_{min}} \quad (2)$$

2.3 Constitution des séries statistiques de l'oscillation australe (OA)

Il existe plusieurs indices permettant de quantifier l'intensité de l'OA. Ceux-ci se basent notamment sur la température de surface de l'océan, la pression atmosphérique, l'intensité et la direction des vents ou encore les précipitations (Guay et al. 1999). L'indice qui est utilisé dans le cadre de ce travail est l'*Oceanic Niño Index* (ONI) ou l'*indice océanique Niño* (ION). C'est maintenant l'indice le plus utilisé par la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). Cet indice est en fait la moyenne de

la température de surface de trois mois enregistrés dans l'est du Pacifique central. Cette zone est nommée *Niño 3.4*. Un épisode El Niño correspond à une hausse de plus 0,5 °C de la température des eaux de l'est de l'océan Pacifique au niveau de l'Équateur alors que pour La Niña, c'est une diminution de plus 0,5 °C dans la même zone (Dahlman, 2009).

On a donc constitué quatre séries saisonnières (hiver et printemps) à partir de trois indices d'ONI en hiver et quatre au printemps :

- 1) JAS-1 correspond à la moyenne des températures de surface des mois juillet, août et septembre de l'année précédant l'hiver et le printemps qui surviennent l'année suivante au Québec.
- 2) OND-1 est la moyenne des températures de surface des mois d'octobre, novembre et décembre de l'année précédant l'hiver et le printemps qui surviennent l'année suivante au Québec.
- 3) JFM correspond à la moyenne des températures de surface des mois de janvier, février et mars de l'année, c'est-à-dire le même hiver qu'au Québec.
- 4) AMJ correspond à la moyenne des températures de surface des mois d'avril, mai et juin de l'année, c'est-à-dire le même printemps qu'au Québec. Cette variable ne sera comparée qu'aux débits printaniers.

Les valeurs de ces indices ont été tirées du site web de la NOAA (http://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php, 5 mai 2018).

2.4 Séries des épisodes El Niño et La Niña

2.4.1 Série complète

Une première série est constituée des indices décrits ci-dessus pour l'ensemble des 67 années. Elle ne tient pas compte de l'intensité des épisodes El Niño et La Niña. Cette série est utilisée afin de vérifier si on obtient de meilleurs résultats en sélectionnant seulement les épisodes de la phase de l'OA qui nous intéresse.

2.4.2 Séries de l'ensemble des épisodes El Niño et La Niña en fonction de différentes intensités

Pour répondre à notre objectif principal, on a constitué deux autres séries. La première série est composée exclusivement des épisodes El Niño de faible à très forte intensité alors que la seconde est formée exclusivement par ceux de la Niña de faible à forte intensité (Golden Gates Weather, 2017). Les années d'occurrence de ces différents épisodes sont consignées dans le tableau 2.2. Le nombre d'épisodes ainsi que l'étendue des valeurs d'ONI sont présentés au tableau 2.3.

Tableau 2.2

Classification des épisodes El Niño et La Niña en fonction de leur intensité

| El Niño | | La Niña | |
|----------------|------------------|----------------|------------------|
| Années | Intensité | Années | Intensité |
| 1951-1952 | Modérée | 1954-1955 | Faible |
| 1952-1953 | Faible | 1955-1956 | Modérée |
| 1953-1954 | Faible | 1964-1965 | Faible |
| 1957-1958 | Forte | 1970-1971 | Modérée |
| 1958-1959 | Faible | 1971-1972 | Faible |
| 1963-1964 | Modérée | 1973-1974 | Forte |
| 1965-1966 | Forte | 1974-1975 | Faible |
| 1968-1969 | Modérée | 1975-1976 | Forte |
| 1969-1970 | Faible | 1983-1984 | Faible |
| 1972-1973 | Forte | 1984-1985 | Faible |
| 1976-1977 | Faible | 1988-1989 | Forte |
| 1977-1978 | Faible | 1995-1996 | Modérée |
| 1979-1980 | Faible | 1998-1999 | Forte |
| 1982-1983 | Très forte | 1999-2000 | Forte |
| 1986-1987 | Modérée | 2000-2001 | Faible |
| 1987-1988 | Forte | 2005-2006 | Faible |
| 1991-1992 | Forte | 2007-2008 | Forte |
| 1994-1995 | Modérée | 2008-2009 | Faible |
| 1997-1998 | Très forte | 2010-2011 | Forte |
| 2002-2003 | Modérée | 2011-2012 | Modérée |
| 2004-2005 | Faible | 2016-2017 | Faible |
| 2006-2007 | Faible | | |
| 2009-2010 | Modérée | | |
| 2014-2015 | Faible | | |
| 2015-2016 | Très forte | | |

2.4.3 Séries des épisodes d'El Niño et La Niña les plus intenses

Finalement, on a exclu tous les épisodes de faible intensité de deux phases de l'OA. On a ainsi obtenu deux autres séries constituées seulement des épisodes d'intensité modérée à très forte. L'hypothèse sous-jacente à cette analyse est de démontrer l'absence

de l'influence des épisodes de faible intensité sur les caractéristiques des débits en hiver et au printemps au Québec. Le nombre d'épisodes ainsi que l'étendue des valeurs d'ONI sont présentés au tableau 2.3.

Tableau 2.3

Nombre d'épisodes par séries de 1950 à 2017

| Séries | Étendue des valeurs d'ONI | Nombre d'épisodes |
|--|---------------------------|-------------------|
| El Niño d'intensité faible à très forte | 0,5 à 2,5 | 25 |
| El Niño d'intensité modérée à très forte | 1 à 2,5 | 15 |
| La Niña d'intensité faible à forte | -0,5 à -1,9 | 21 |
| La Niña d'intensité modérée à forte | -1 à -1,9 | 11 |
| Série complète | -1,9 à 2,5 | 67 |

2.5 Analyses statistiques

Dans un premier temps, la série complète des variables de l'OA est corrélée aux variables de débits pour l'hiver et le printemps grâce à des corrélations simples. Ces résultats sont comparés à ceux obtenus en utilisant seulement les épisodes El Niño et La Niña. Ceci permettra de répondre à l'hypothèse selon laquelle qu'on obtient de meilleurs résultats en utilisant les épisodes El Niño ou La Niña.

Dans un second temps, les séries discriminant les épisodes de faible intensité sont analysées par des analyses de corrélation simple afin de vérifier l'hypothèse que le signal des épisodes de plus faible intensité brouille le signal des épisodes les plus intenses à modérés. La méthode de corrélation utilisée est celle des corrélations de Pearson.

CHAPITRE III

COMPARAISON DE L'INFLUENCE DES INDICES OCÉANIQUES NIÑO SUR LES CARACTÉRISTIQUES DES DÉBITS EN HIVER ET AU PRINTEMPS

3.1 Relation entre les débits moyens journaliers saisonniers et les indices océaniques Niño

Les tableaux subséquents des chapitres III à V présentent les coefficients de corrélation obtenus grâce aux analyses de corrélation simple entre les différentes variables hydrologiques et les indices d'ONI pour l'hiver et le printemps. Les coefficients de corrélation calculés entre les débits moyens journaliers et les indices océaniques Niño sont présentés au tableau 3.1. Il ressort de ce tableau que ces coefficients de corrélation sont statistiquement significatifs dans les régions hydroclimatiques du Sud-Est en rive sud et du Sud-Ouest en rive nord au printemps seulement. Aucun coefficient de corrélation n'est significatif dans la région hydroclimatique de l'Est. Dans les deux premières régions, tous les coefficients de corrélation sont négatifs. Les valeurs positives de ces indices océaniques sont ainsi associées aux débits moyens journaliers faibles. Ce sont les indices océaniques hivernaux (JFM) qui sont mieux corrélés aux débits moyens journaliers dans les deux régions. Les indices océaniques estivaux (JAS-1) et automnaux (OND-1) sont aussi mieux corrélés aux débits moyens journaliers dans la région du Sud-Est.

Tableau 3.1

Coefficients de corrélation calculés entre les débits moyens journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices océaniques Niño pendant la période 1950-2017

| Code | Rivière | Hiver | | | Printemps | | | |
|-------------------------------------|---------------------|--------|--------|--------|-----------|----------|----------|--------|
| | | JAS-1 | OND-1 | JFM | JAS-1 | OND-1 | JFM | AMJ |
| Région hydroclimatique du Sud-Est | | | | | | | | |
| SE1 | Châteauguay | 0,060 | 0,106 | 0,042 | -0,191 | -0,214* | -0,208* | -0,108 |
| SE2 | Eaton | 0,022 | 0,117 | 0,100 | -0,241** | -0,245** | -0,246** | -0,108 |
| SE3 | Nicolet SW | 0,058 | 0,109 | 0,095 | -0,285** | -0,311** | -0,326** | -0,111 |
| SE4 | Etchemin | -0,079 | -0,028 | -0,042 | -0,174 | -0,173 | -0,194 | -0,128 |
| SE5 | Beaurivage | 0,027 | 0,076 | 0,059 | -0,212* | -0,215* | -0,247** | -0,187 |
| SE6 | Du Sud | 0,022 | 0,064 | 0,037 | -0,155 | -0,167 | -0,194 | -0,107 |
| Région hydroclimatique de l'Est | | | | | | | | |
| E1 | Ouelle | 0,007 | 0,064 | 0,062 | -0,080 | -0,074 | -0,054 | -0,027 |
| E2 | Du Loup | 0,058 | 0,079 | 0,055 | 0,031 | 0,050 | 0,022 | -0,062 |
| E3 | Trois-Pistoles | 0,041 | 0,065 | 0,018 | 0,054 | 0,054 | 0,037 | -0,009 |
| E4 | Rimouski | 0,019 | 0,054 | -0,009 | -0,048 | -0,076 | -0,097 | -0,111 |
| E5 | Matane | -0,092 | -0,075 | -0,100 | -0,054 | -0,020 | -0,046 | -0,081 |
| E6 | Blanche | -0,023 | -0,025 | -0,098 | 0,031 | 0,023 | -0,033 | -0,076 |
| Région hydroclimatique du Sud-Ouest | | | | | | | | |
| SW1 | De La Petite Nation | 0,132 | 0,123 | 0,073 | -0,182 | -0,211* | -0,224* | -0,109 |
| SW2 | Du Nord | 0,158 | 0,198 | 0,179 | -0,171 | -0,210* | -0,253** | -0,104 |
| SW3 | L'Assomption | 0,088 | 0,121 | 0,107 | -0,158 | -0,175 | -0,215* | -0,090 |
| SW4 | Matawin | 0,020 | 0,032 | -0,026 | -0,179 | -0,183 | -0,242** | -0,115 |
| SW5 | Vermillon | 0,096 | 0,134 | 0,101 | -0,151 | -0,144 | -0,186 | -0,131 |

* = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 10 %.

** = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 5 %.

3.2 Relation entre les débits maximums journaliers saisonniers et les indices océaniques Niño

Contrairement aux débits moyens journaliers, il n'existe qu'un seul lien statistiquement significatif entre les débits maximums journaliers printaniers et les indices océaniques Niño (Tableau 3.2). À l'hiver, on observe cependant que deux rivières montrent des relations significatives, soit la rivière Châteauguay et la rivière Vermillon.

Pour la première, les coefficients sont négatifs alors que pour la seconde, ils sont positifs.

Tableau 3.2

Coefficients de corrélation calculés entre les débits maximums journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices océaniques Niño pendant la période 1950-2017

| Code | Rivière | Hiver | | | Printemps | | | |
|-------------------------------------|---------------------|----------|----------|----------|-----------|--------|--------|--------|
| | | JAS-1 | OND-1 | JFM | JAS-1 | OND-1 | JFM | AMJ |
| Région hydroclimatique du Sud-Est | | | | | | | | |
| SE1 | Châteauguay | -0,398** | -0,352** | -0,357** | 0,034 | -0,024 | -0,086 | -0,084 |
| SE2 | Eaton | -0,092 | -0,150 | -0,128 | 0,095 | 0,186 | 0,208* | 0,110 |
| SE3 | Nicolet SW | 0,012 | -0,066 | -0,069 | 0,167 | 0,105 | 0,132 | 0,016 |
| SE4 | Etchemin | 0,131 | 0,147 | 0,144 | -0,153 | -0,091 | -0,043 | 0,160 |
| SE5 | Beaurivage | -0,003 | -0,033 | -0,066 | 0,042 | 0,026 | 0,030 | 0,107 |
| SE6 | Du Sud | 0,169 | 0,150 | 0,119 | -0,157 | -0,145 | -0,121 | -0,031 |
| Région hydroclimatique de l'Est | | | | | | | | |
| E1 | Ouelle | -0,153 | -0,108 | -0,153 | -0,106 | -0,099 | 0,005 | 0,131 |
| E2 | Du Loup | 0,105 | 0,028 | 0,002 | -0,132 | -0,136 | -0,058 | -0,008 |
| E3 | Trois-Pistoles | -0,004 | -0,038 | -0,028 | 0,119 | 0,099 | 0,105 | 0,080 |
| E4 | Rimouski | -0,056 | 0,002 | 0,064 | -0,114 | -0,083 | -0,033 | 0,046 |
| E5 | Matane | -0,095 | -0,070 | -0,137 | -0,173 | -0,124 | -0,089 | 0,003 |
| E6 | Blanche | -0,023 | -0,001 | -0,124 | 0,095 | 0,148 | 0,144 | 0,085 |
| Région hydroclimatique du Sud-Ouest | | | | | | | | |
| SW1 | De La Petite Nation | 0,141 | 0,121 | 0,136 | 0,136 | 0,175 | 0,108 | -0,012 |
| SW2 | Du Nord | -0,065 | -0,088 | -0,105 | -0,162 | -0,135 | -0,090 | 0,051 |
| SW3 | L'Assomption | 0,018 | 0,027 | -0,014 | -0,151 | -0,131 | -0,015 | 0,141 |
| SW4 | Matawin | -0,150 | -0,126 | -0,080 | 0,170 | 0,145 | 0,109 | -0,055 |
| SW5 | Vermillon | 0,227* | 0,315** | 0,323** | -0,146 | -0,097 | -0,115 | 0,001 |

* = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 10 %.

** = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 5 %.

3.3 Relation entre les périodes d'occurrence des débits maximums journaliers saisonniers et les indices océaniques Niño

Les coefficients de corrélation entre les périodes d'occurrence des débits maximums journaliers et les indices océaniques Niño sont principalement significatifs dans la région du Sud-Est en rive nord au printemps (Tableau 3.3). Ces coefficients de corrélation sont tous négatifs. Ainsi, les valeurs positives des indices océaniques sont associées à des occurrences hâtives des débits maximums journaliers au printemps dans cette région hydroclimatique. Les périodes d'occurrence sont mieux corrélées aux indices océaniques estivaux, automnaux et hivernaux.

Tableau 3.3

Coefficients de corrélation calculés entre les périodes d'occurrence des débits maximums journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices océaniques Niño pendant la période 1950-2017

| Code | Rivière | Hiver | | | Printemps | | | |
|-------------------------------------|---------------------|--------|---------|--------|-----------|----------|----------|----------|
| | | JAS-1 | OND-1 | JFM | JAS-1 | OND-1 | JFM | AMJ |
| Région hydroclimatique du Sud-Est | | | | | | | | |
| SE1 | Châteauguay | 0,180 | 0,248** | 0,205* | 0,049 | 0,016 | -0,014 | -0,076 |
| SE2 | Eaton | 0,084 | 0,074 | 0,082 | 0,054 | 0,032 | 0,040 | -0,084 |
| SE3 | Nicolet SW | 0,060 | 0,073 | 0,055 | -0,014 | -0,005 | -0,004 | -0,059 |
| SE4 | Etchemin | -0,094 | -0,059 | -0,073 | -0,071 | -0,089 | -0,138 | -0,073 |
| SE5 | Beaurivage | -0,038 | 0,024 | 0,020 | 0,048 | 0,006 | 0,015 | -0,007 |
| SE6 | Du Sud | -0,015 | 0,058 | 0,076 | -0,086 | -0,120 | -0,080 | -0,053 |
| Région hydroclimatique de l'Est | | | | | | | | |
| E1 | Ouelle | 0,018 | 0,038 | 0,080 | -0,032 | -0,060 | -0,102 | -0,167 |
| E2 | Du Loup | 0,026 | 0,046 | 0,058 | -0,120 | -0,197 | -0,206* | -0,199 |
| E3 | Trois-Pistoles | 0,057 | 0,069 | 0,079 | -0,190 | -0,188 | -0,201 | -0,128 |
| E4 | Rimouski | 0,053 | 0,060 | 0,051 | -0,099 | -0,076 | -0,129 | -0,214* |
| E5 | Matane | 0,162 | 0,150 | 0,158 | -0,091 | -0,121 | -0,140 | -0,082 |
| E6 | Blanche | 0,026 | 0,072 | 0,108 | -0,116 | -0,137 | -0,131 | -0,108 |
| Région hydroclimatique du Sud-Ouest | | | | | | | | |
| SW1 | De La Petite Nation | -0,045 | -0,028 | 0,024 | -0,114 | -0,095 | -0,074 | 0,003 |
| SW2 | Du Nord | 0,021 | 0,018 | -0,001 | -0,181 | -0,164 | -0,153 | -0,041 |
| SW3 | L'Assomption | 0,141 | 0,116 | 0,120 | -0,224* | -0,258** | -0,282** | -0,289** |
| SW4 | Matawin | -0,048 | 0,001 | -0,009 | -0,369** | -0,328** | -0,302** | -0,182 |
| SW5 | Vermillon | -0,039 | 0,043 | 0,031 | -0,349** | -0,325** | -0,297** | -0,130 |

* = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 10 %.

** = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 5 %.

3.4 Relation entre les débits minimums journaliers saisonniers et les indices océaniques Niño

Il existe très peu de lien significatif entre la magnitude des débits minimums journaliers et les indices océaniques à l'échelle du Québec. De fait, ce lien a été observé seulement dans deux bassins versants dans la région hydroclimatique du Sud-Est et un seul dans la région hydroclimatique du Sud-Ouest (Tableau 3.4).

Tableau 3.4

Coefficients de corrélation calculés entre les débits minimums journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices océaniques Niño pendant la période 1950-2017

| Code | Rivière | Hiver | | | Printemps | | | |
|-------------------------------------|---------------------|--------|--------|--------|-----------|----------|----------|--------|
| | | JAS-1 | OND-1 | JFM | JAS-1 | OND-1 | JFM | AMJ |
| Région hydroclimatique du Sud-Est | | | | | | | | |
| SE1 | Châteauguay | -0,061 | -0,056 | -0,074 | -0,047 | -0,087 | -0,083 | -0,016 |
| SE2 | Eaton | -0,003 | 0,033 | 0,056 | -0,029 | -0,121 | -0,144 | -0,022 |
| SE3 | Nicolet SW | 0,036 | 0,043 | 0,048 | -0,128 | -0,211* | -0,206* | -0,117 |
| SE4 | Etchemin | 0,008 | -0,029 | -0,012 | 0,020 | -0,059 | -0,077 | -0,018 |
| SE5 | Beaurivage | 0,038 | 0,054 | 0,100 | -0,107 | -0,165 | -0,139 | 0,005 |
| SE6 | Du Sud | 0,207* | 0,236* | 0,194 | -0,021 | -0,130 | -0,117 | -0,033 |
| Région hydroclimatique de l'Est | | | | | | | | |
| E1 | Ouelle | -0,012 | -0,015 | -0,012 | -0,099 | -0,195 | -0,142 | -0,026 |
| E2 | Du Loup | 0,032 | 0,059 | 0,055 | 0,018 | 0,023 | -0,016 | 0,035 |
| E3 | Trois-Pistoles | 0,047 | 0,027 | 0,026 | 0,149 | 0,085 | 0,087 | 0,079 |
| E4 | Rimouski | 0,042 | 0,074 | 0,001 | -0,003 | -0,005 | -0,046 | -0,090 |
| E5 | Matane | -0,149 | -0,111 | -0,159 | 0,153 | 0,133 | 0,142 | 0,006 |
| E6 | Blanche | -0,038 | -0,031 | -0,126 | 0,184 | 0,158 | 0,161 | 0,056 |
| Région hydroclimatique du Sud-Ouest | | | | | | | | |
| SW1 | De La Petite Nation | 0,091 | 0,078 | 0,016 | -0,061 | -0,047 | -0,098 | -0,112 |
| SW2 | Du Nord | 0,086 | 0,069 | 0,048 | -0,178 | -0,255** | -0,251** | 0,032 |
| SW3 | L'Assomption | 0,008 | 0,019 | 0,010 | -0,071 | -0,101 | -0,143 | 0,008 |
| SW4 | Matawin | -0,032 | -0,031 | -0,124 | -0,141 | -0,130 | -0,203 | -0,053 |
| SW5 | Vermillon | 0,112 | 0,129 | 0,078 | -0,005 | 0,023 | -0,074 | -0,128 |

* = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 10 %.

** = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 5 %.

3.5 Relation entre les périodes d'occurrence des débits minimums journaliers saisonniers et les indices océaniques Niño

À l'instar de la magnitude, il existe très peu de lien significatif entre les périodes d'occurrence des débits minimums et les indices océaniques au Québec. De fait, le lien significatif a été observé seulement dans deux bassins versants de la région

hydroclimatique du Sud-Est et deux autres situés dans la région hydroclimatique du Sud-Ouest (Tableau 3.5).

Tableau 3.5

Coefficients de corrélation calculés entre les périodes d'occurrence des débits minimums journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices océaniques Niño pendant la période 1950-2017

| Code | Rivière | Hiver | | | Printemps | | | |
|-------------------------------------|---------------------|--------|--------|--------|-----------|--------|--------|---------|
| | | JAS-1 | OND-1 | JFM | JAS-1 | OND-1 | JFM | AMJ |
| Région hydroclimatique du Sud-Est | | | | | | | | |
| SE1 | Châteauguay | 0,046 | 0,072 | 0,039 | -0,042 | -0,013 | 0,016 | -0,027 |
| SE2 | Eaton | 0,149 | 0,162 | 0,187 | -0,138 | -0,162 | -0,178 | -0,219* |
| SE3 | Nicolet SW | -0,029 | 0,053 | 0,088 | 0,047 | 0,035 | 0,001 | -0,198 |
| SE4 | Etchemin | 0,174 | 0,219* | 0,151 | -0,011 | -0,004 | -0,045 | -0,051 |
| SE5 | Beaurivage | 0,008 | 0,032 | 0,013 | 0,101 | 0,189 | 0,095 | 0,053 |
| SE6 | Du Sud | 0,065 | 0,100 | 0,039 | 0,072 | 0,124 | 0,089 | 0,027 |
| Région hydroclimatique de l'Est | | | | | | | | |
| E1 | Ouelle | -0,052 | -0,027 | -0,009 | 0,024 | 0,058 | 0,102 | 0,019 |
| E2 | Du Loup | -0,015 | -0,036 | -0,065 | 0,017 | 0,035 | 0,028 | 0,077 |
| E3 | Trois-Pistoles | 0,010 | -0,029 | -0,023 | 0,003 | 0,062 | 0,089 | 0,120 |
| E4 | Rimouski | -0,005 | -0,015 | -0,023 | 0,143 | 0,198 | 0,187 | 0,104 |
| E5 | Matane | -0,129 | -0,053 | -0,049 | 0,098 | 0,107 | 0,086 | -0,040 |
| E6 | Blanche | 0,017 | 0,033 | 0,007 | 0,060 | 0,077 | 0,058 | -0,022 |
| Région hydroclimatique du Sud-Ouest | | | | | | | | |
| SW1 | De La Petite Nation | 0,013 | -0,015 | -0,074 | 0,119 | 0,151 | 0,144 | 0,119 |
| SW2 | Du Nord | -0,008 | -0,019 | 0,013 | 0,119 | 0,142 | 0,096 | -0,085 |
| SW3 | L'Assomption | 0,030 | 0,035 | 0,019 | 0,213* | 0,231* | 0,228* | 0,067 |
| SW4 | Matawin | 0,006 | -0,036 | -0,012 | 0,164 | 0,233* | 0,205* | 0,053 |
| SW5 | Vermillon | 0,015 | 0,001 | 0,036 | 0,137 | 0,175 | 0,141 | 0,024 |

* = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 10 %.

** = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 5 %.

3.6 Relation entre les indices de variabilité de l'écoulement et les indices océaniques Niño

En ce qui concerne les coefficients de variation (CV), on observe une corrélation significative dans la moitié des bassins versants de la région hydroclimatique de l'Est au printemps seulement (Tableau 3.6). Cette corrélation est positive, c'est-à-dire que les valeurs positives des indices océaniques sont associées à une forte variabilité des débits interjournaliers printaniers. C'est l'indice océanique printanier (AMJ) qui est mieux corrélé aux coefficients de variation. Cette corrélation a été aussi observée dans deux bassins respectivement dans les régions hydroclimatiques du Sud-Est et du Sud-Ouest.

Quant aux coefficients d'immodération (CI), il existe très peu de corrélation significative à l'échelle du Québec (Tableau 3.7). En effet, cette corrélation est observée exclusivement au printemps dans deux bassins versants dans les régions hydroclimatiques du Sud-Est et du Sud-Ouest et dans un seul bassin versant dans la région de l'Est. Cette corrélation est aussi positive.

Tableau 3.6

Coefficients de corrélation calculés entre les coefficients de variation saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices océaniques Niño pendant la période 1950-2017

| Code | Rivière | Hiver | | | Printemps | | | |
|-------------------------------------|---------------------|--------|--------|---------------|-----------|---------------|---------------|----------------|
| | | JAS-1 | OND-1 | JFM | JAS-1 | OND-1 | JFM | AMJ |
| Région hydroclimatique du Sud-Est | | | | | | | | |
| SE1 | Châteauguay | 0,108 | 0,091 | 0,046 | -0,009 | -0,026 | -0,015 | -0,015 |
| SE2 | Eaton | -0,011 | -0,007 | -0,055 | 0,151 | 0,122 | 0,133 | -0,036 |
| SE3 | Nicolet SW | 0,038 | 0,018 | 0,021 | 0,137 | 0,175 | 0,158 | 0,037 |
| SE4 | Etchemin | 0,026 | 0,086 | 0,112 | 0,045 | 0,117 | 0,168 | 0,236* |
| SE5 | Beaurivage | -0,006 | 0,040 | 0,017 | 0,098 | 0,130 | 0,135 | 0,109 |
| SE6 | Du Sud | -0,019 | 0,002 | 0,041 | 0,063 | 0,169 | 0,177 | 0,320** |
| Région hydroclimatique de l'Est | | | | | | | | |
| E1 | Ouelle | 0,024 | 0,052 | 0,069 | 0,049 | 0,146 | 0,219* | 0,292** |
| E2 | Du Loup | -0,018 | 0,031 | 0,046 | 0,008 | 0,086 | 0,130 | 0,206* |
| E3 | Trois-Pistoles | 0,048 | 0,085 | 0,075 | -0,019 | 0,088 | 0,126 | 0,218* |
| E4 | Rimouski | -0,051 | -0,019 | -0,015 | -0,101 | -0,023 | 0,053 | 0,161 |
| E5 | Matane | 0,054 | 0,082 | 0,110 | -0,167 | -0,080 | -0,041 | 0,070 |
| E6 | Blanche | -0,015 | 0,036 | 0,040 | -0,136 | -0,064 | -0,040 | 0,034 |
| Région hydroclimatique du Sud-Ouest | | | | | | | | |
| SW1 | De La Petite Nation | 0,142 | 0,193 | 0,219* | 0,002 | 0,000 | 0,007 | -0,008 |
| SW2 | Du Nord | 0,062 | 0,124 | 0,145 | 0,189 | 0,213* | 0,198 | 0,071 |
| SW3 | L'Assomption | 0,030 | 0,103 | 0,139 | 0,139 | 0,177 | 0,177 | 0,085 |
| SW4 | Matawin | 0,057 | 0,100 | 0,133 | -0,027 | 0,033 | 0,090 | 0,098 |
| SW5 | Vermillon | 0,008 | 0,060 | 0,068 | -0,087 | 0,000 | 0,060 | 0,150 |

* = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 10 %.

** = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 5 %.

Tableau 3.7

Coefficients de corrélation calculés entre les coefficients d'immodération saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices océaniques Niño pendant la période 1950-2017

| Code | Rivière | Hiver | | | Printemps | | | |
|-------------------------------------|---------------------|--------|--------|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | JAS-1 | OND-1 | JFM | JAS-1 | OND-1 | JFM | AMJ |
| Région hydroclimatique du Sud-Est | | | | | | | | |
| SE1 | Châteauguay | 0,127 | 0,124 | 0,083 | -0,034 | -0,002 | -0,014 | -0,051 |
| SE2 | Eaton | 0,034 | 0,084 | 0,062 | 0,032 | 0,061 | 0,054 | -0,059 |
| SE3 | Nicolet SW | 0,043 | 0,059 | 0,042 | 0,013 | 0,072 | 0,060 | 0,016 |
| SE4 | Etchemin | 0,041 | 0,101 | 0,076 | -0,115 | -0,038 | -0,002 | 0,050 |
| SE5 | Beaurivage | -0,085 | -0,041 | -0,100 | 0,042 | 0,079 | 0,056 | 0,005 |
| SE6 | Du Sud | -0,096 | -0,070 | -0,064 | 0,067 | 0,131 | 0,182 | 0,225* |
| Région hydroclimatique de l'Est | | | | | | | | |
| E1 | Ouelle | 0,070 | 0,106 | 0,107 | 0,166 | 0,265** | 0,343** | 0,345** |
| E2 | Du Loup | 0,027 | 0,052 | 0,067 | -0,034 | -0,023 | 0,060 | 0,114 |
| E3 | Trois-Pistoles | -0,001 | 0,045 | 0,045 | -0,081 | 0,011 | 0,014 | -0,003 |
| E4 | Rimouski | -0,052 | -0,039 | -0,018 | 0,027 | 0,079 | 0,148 | 0,226* |
| E5 | Matane | -0,013 | 0,013 | 0,049 | -0,174 | -0,146 | -0,125 | 0,048 |
| E6 | Blanche | -0,043 | -0,010 | 0,020 | -0,018 | 0,031 | 0,048 | 0,101 |
| Région hydroclimatique du Sud-Ouest | | | | | | | | |
| SW1 | De La Petite Nation | 0,122 | 0,170 | 0,189 | -0,018 | -0,044 | -0,022 | 0,013 |
| SW2 | Du Nord | 0,144 | 0,171 | 0,144 | 0,266** | 0,308** | 0,285** | 0,085 |
| SW3 | L'Assomption | 0,038 | 0,069 | 0,064 | 0,169 | 0,206* | 0,187 | 0,108 |
| SW4 | Matawin | 0,109 | 0,119 | 0,129 | 0,028 | 0,054 | 0,095 | 0,043 |
| SW5 | Vermillon | -0,025 | 0,006 | 0,014 | -0,122 | -0,102 | -0,044 | 0,144 |

* = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 10 %.

** = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 5 %.

CHAPITRE IV

COMPARAISON DE L'INFLUENCE DE L'INTENSITÉ DES ÉPISODES EL NIÑO SUR LES CARACTÉRISTIQUES DES DÉBITS EN HIVER ET AU PRINTEMPS

4.1 Analyse de l'influence des épisodes El Niño d'intensité faible à très forte

4.1.1 Relation entre les débits moyens journaliers saisonniers et les épisodes d'El Niño d'intensité faible à très forte

Les coefficients de corrélation calculés entre les deux variables en hiver et au printemps sont présentés au tableau 4.1. Il ressort de ce tableau que 13 des 17 rivières à l'étude montrent une corrélation significative entre les débits moyens hivernaux et les épisodes El Niño d'intensité faible à très forte. C'est avec la variable JFM qu'on note le plus grand nombre de relations significatives. Sur le plan spatial, ce sont les rivières des régions hydroclimatiques de l'Est en rive sud au nord de 47°N et du sud-ouest en rive nord qui sont majoritairement corrélées aux épisodes El Niño. Dans la première région, seuls les débits moyens journaliers de la rivière Ouella ne sont corrélés à aucun épisode d'El Niño. Au printemps, on observe moins de relations significatives qu'en hiver. Cependant, il y a tout de même quatre des cinq rivières de la région hydroclimatique du Sud-Ouest qui montrent au moins un coefficient de corrélation significatif. Ceux-ci sont tous positifs. Il ressort clairement de cette analyse que la hausse de l'intensité des épisodes El Niño se traduit par celle de la magnitude des débits moyens journaliers aussi bien en hiver qu'au printemps (Figures 4.1 et 4.2). Toutefois, cette relation est inversée au printemps pour la rivière Eaton, la seule rivière dont les débits moyens journaliers sont corrélés significativement aux épisodes El Niño dans la région hydroclimatique du Sud-Est.

Tableau 4.1

Coefficients de corrélation calculés entre les débits moyens journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices des épisodes El Niño d'intensité faible à très forte pendant la période 1950-2017

| Code | Rivière | Hiver | | | Printemps | | | |
|-------------------------------------|---------------------|---------|---------|---------|-----------|---------|---------|--------|
| | | JAS-1 | OND-1 | JFM | JAS-1 | OND-1 | JFM | AMJ |
| Région hydroclimatique du Sud-Est | | | | | | | | |
| SE1 | Châteauguay | 0,353* | 0,494** | 0,308 | -0,021 | -0,050 | -0,035 | -0,092 |
| SE2 | Eaton | 0,053 | 0,222 | 0,200 | -0,362* | -0,385* | -0,380* | -0,088 |
| SE3 | Nicolet SW | 0,308 | 0,482** | 0,394* | -0,220 | -0,274 | -0,331 | -0,013 |
| SE4 | Etchemin | 0,182 | 0,308 | 0,298 | -0,172 | -0,186 | -0,237 | -0,035 |
| SE5 | Beaurivage | 0,275 | 0,439** | 0,429** | -0,034 | 0,044 | -0,025 | -0,059 |
| SE6 | Du Sud | 0,420** | 0,577** | 0,448** | -0,048 | -0,034 | -0,060 | 0,009 |
| Région hydroclimatique de l'Est | | | | | | | | |
| E1 | Ouelle | 0,181 | 0,271 | 0,280 | 0,206 | 0,255 | 0,245 | 0,081 |
| E2 | Du Loup | 0,115 | 0,292 | 0,381* | 0,238 | 0,278 | 0,305 | 0,141 |
| E3 | Trois-Pistoles | 0,204 | 0,413** | 0,524** | 0,062 | 0,072 | 0,169 | 0,130 |
| E4 | Rimouski | 0,300 | 0,492** | 0,534** | 0,039 | -0,007 | -0,002 | -0,135 |
| E5 | Matane | 0,108 | 0,209 | 0,418** | -0,252 | -0,193 | -0,177 | -0,089 |
| E6 | Blanche | 0,266 | 0,285 | 0,380* | -0,058 | -0,100 | -0,148 | -0,121 |
| Région hydroclimatique du Sud-Ouest | | | | | | | | |
| SW1 | De La Petite Nation | 0,307 | 0,519** | 0,483** | 0,298 | 0,351* | 0,272 | 0,038 |
| SW2 | Du Nord | 0,167 | 0,401** | 0,427** | 0,236 | 0,172 | 0,079 | 0,018 |
| SW3 | L'Assomption | 0,084 | 0,266 | 0,307 | 0,340* | 0,350* | 0,222 | 0,095 |
| SW4 | Matawin | 0,238 | 0,389* | 0,330 | 0,391* | 0,425** | 0,324 | 0,119 |
| SW5 | Vermillon | 0,204 | 0,399** | 0,411** | 0,382* | 0,483** | 0,380* | 0,100 |

* = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 10 %.

** = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 5 %.

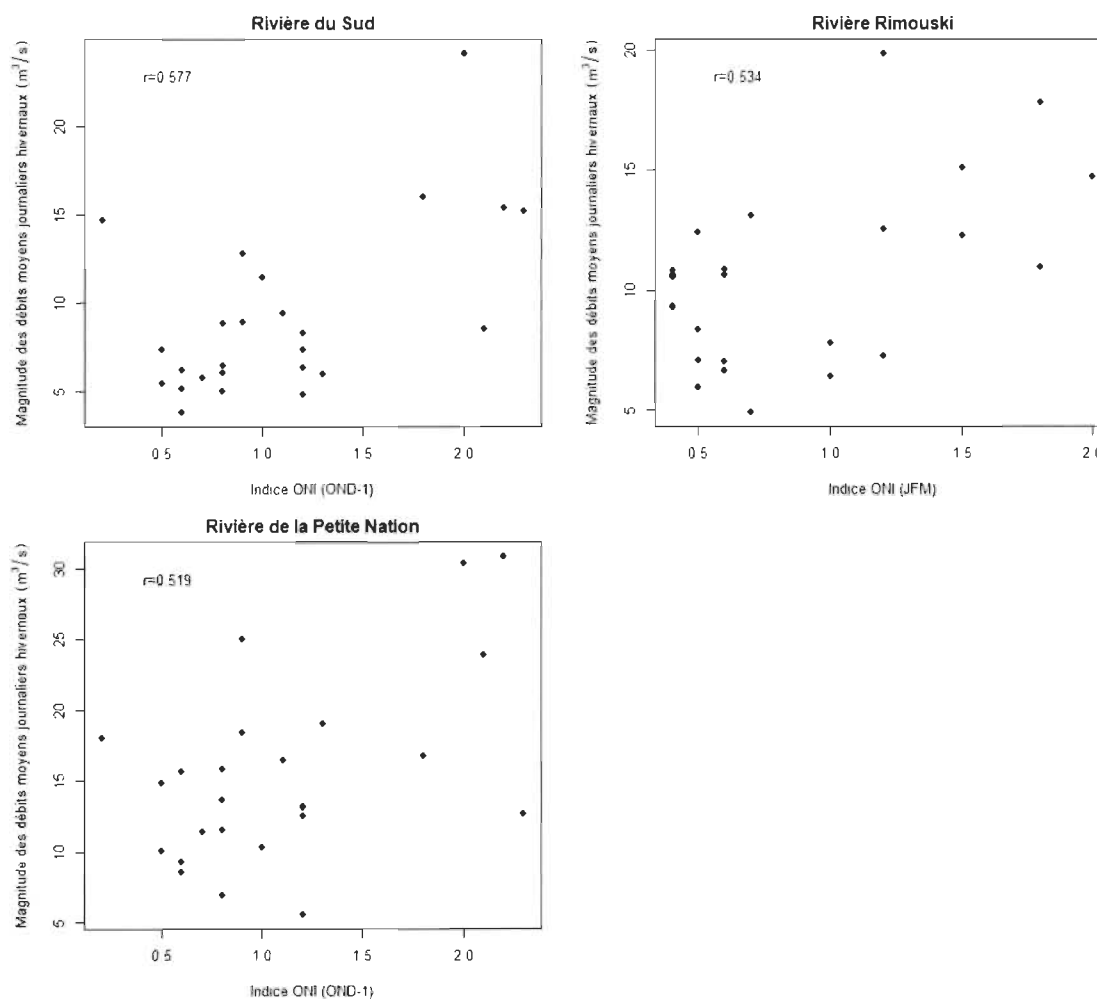


Figure 4.1 Relation entre la magnitude des débits moyens journaliers hivernaux et l'indice ONI lors des épisodes El Niño d'intensité faible à très forte pour la période 1950-2017.

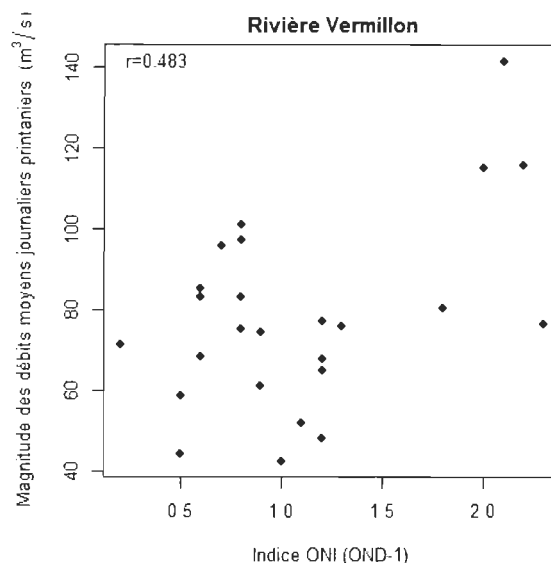


Figure 4.2 Relation entre la magnitude des débits moyens journaliers printaniers et l'indice ONI lors des épisodes El Niño d'intensité faible à très forte pour la période 1950-2017.

4.1.2 Relation entre les débits maximums journaliers saisonniers et les épisodes d'El Niño d'intensité faible à très forte

À l'instar des débits moyens journaliers saisonniers, les débits maximums journaliers sont aussi significativement corrélés aux indices des épisodes El Niño d'intensité faible à très forte pour de nombreuses rivières en hiver (Tableau 4.2). Dans les régions hydroclimatiques de l'Est et du Sud-Ouest, les débits de toutes les rivières sont corrélés aux épisodes El Niño alors que dans la région hydroclimatique du Sud-Est, plus de la moitié des rivières le sont. Cette corrélation est positive dans les trois régions hydroclimatiques (Figures 4.3 et 4.4). C'est aussi l'indice hivernal (JFM) qui est mieux corrélé aux débits maximums journaliers hivernaux. Au printemps, il y a très peu de rivières dont les débits maximums journaliers sont corrélés significativement aux indices des épisodes El Niño. De fait, on dénombre seulement trois rivières dont deux sont situées dans la région hydroclimatique de l'Est et une seule, dans la région hydroclimatique du Sud-Ouest. Contrairement aux débits moyens journaliers, les débits maximums journaliers d'aucune rivière dans la région hydroclimatique du Sud-Est ne sont corrélés significativement à aucun indice des épisodes El Niño.

Tableau 4.2

Coefficients de corrélation calculés entre les débits maximums journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices des épisodes El Niño d'intensité faible à très forte pendant la période 1950-2017

| Code | Rivière | Hiver | | | Printemps | | | |
|-------------------------------------|---------------------|---------|---------|---------|-----------|--------|---------|---------|
| | | JAS-1 | OND-1 | JFM | JAS-1 | OND-1 | JFM | AMJ |
| Région hydroclimatique du Sud-Est | | | | | | | | |
| SE1 | Châteauguay | 0,431** | 0,512** | 0,406** | 0,259 | 0,222 | 0,103 | -0,080 |
| SE2 | Eaton | 0,092 | 0,219 | 0,161 | -0,111 | -0,201 | -0,213 | -0,142 |
| SE3 | Nicolet SW | 0,348* | 0,511** | 0,435** | -0,030 | -0,085 | -0,066 | 0,023 |
| SE4 | Etchemin | 0,041 | 0,181 | 0,295 | -0,103 | 0,063 | 0,212 | 0,282 |
| SE5 | Beaurivage | 0,254 | 0,454** | 0,461** | -0,139 | 0,027 | 0,156 | 0,207 |
| SE6 | Du Sud | 0,136 | 0,269 | 0,356* | -0,208 | -0,006 | 0,163 | 0,329 |
| Région hydroclimatique de l'Est | | | | | | | | |
| E1 | Ouelle | 0,192 | 0,372* | 0,381* | -0,074 | 0,217 | 0,449** | 0,430** |
| E2 | Du Loup | 0,371* | 0,512** | 0,540** | 0,096 | 0,241 | 0,437** | 0,346* |
| E3 | Trois-Pistoles | 0,231 | 0,380* | 0,423** | -0,088 | 0,117 | 0,238 | 0,269 |
| E4 | Rimouski | 0,164 | 0,250 | 0,444** | -0,004 | 0,007 | 0,218 | 0,154 |
| E5 | Matane | 0,079 | 0,196 | 0,364* | -0,153 | -0,066 | 0,028 | 0,084 |
| E6 | Blanche | 0,249 | 0,267 | 0,348* | 0,035 | 0,047 | -0,022 | -0,160 |
| Région hydroclimatique du Sud-Ouest | | | | | | | | |
| SW1 | De La Petite Nation | 0,246 | 0,454** | 0,505** | 0,207 | 0,239 | 0,243 | 0,141 |
| SW2 | Du Nord | 0,264 | 0,474** | 0,552** | 0,157 | 0,155 | 0,204 | 0,257 |
| SW3 | L'Assomption | 0,092 | 0,255 | 0,402** | 0,096 | 0,227 | 0,195 | 0,231 |
| SW4 | Matawin | 0,368* | 0,491** | 0,523** | 0,221 | 0,370* | 0,311 | 0,169 |
| SW5 | Vermillon | 0,351* | 0,559** | 0,530** | 0,121 | 0,297 | 0,280 | 0,223 |

* = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 10 %.

** = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 5 %.

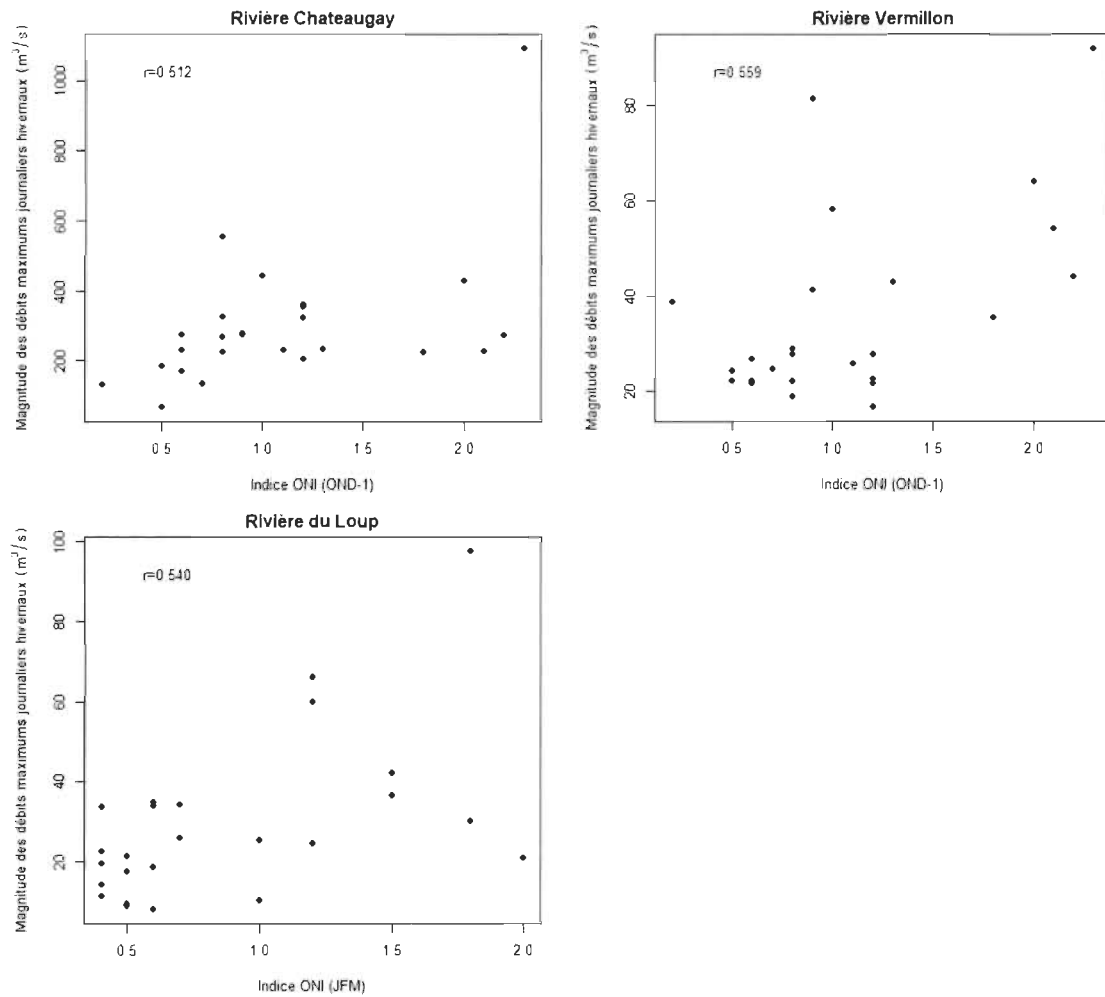


Figure 4.3 Relation entre la magnitude des débits maximums journaliers hivernaux et l'indice ONI lors des épisodes El Niño d'intensité faible à très forte pour la période 1950-2017.

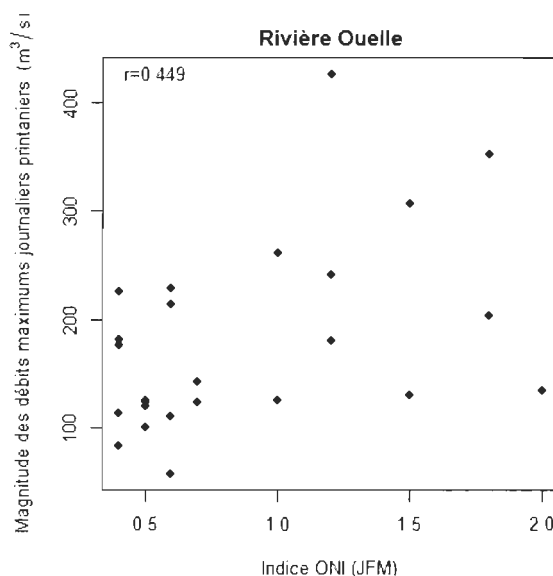


Figure 4.4 Relation entre la magnitude des débits maximums journaliers printaniers et l'indice ONI lors des épisodes El Niño d'intensité faible à très forte pour la période 1950-2017.

4.1.3 Relation entre les périodes d'occurrence des débits maximums journaliers saisonniers et les épisodes d'El Niño d'intensité faible à très forte

Les coefficients de corrélation calculés entre les deux variables sont consignés dans le tableau 4.3. Encore une fois, les épisodes El Niño sont mieux corrélés aux périodes d'occurrence des débits maximums journaliers en hiver qu'au printemps. En hiver, les coefficients de corrélation sont tous positifs. Ainsi, plus les épisodes El Niño sont intenses, les débits maximums journaliers surviennent tard dans la saison hivernale (Figure 4.5). En revanche, c'est le contraire au printemps. En effet, durant cette saison, les coefficients de corrélation sont tous négatifs. Les épisodes d'El Niño les plus intenses sont associés à une occurrence hâtive des débits maximums journaliers dans la saison (Figure 4.6). Sur le plan spatial, les périodes d'occurrence des débits maximums journaliers de toutes les rivières de la région hydroclimatique du Sud-Ouest sont corrélées significativement aux indices des épisodes El Niño, en particulier l'indice hivernal JFM. Dans la région hydroclimatique de l'Est, deux rivières seulement ne le sont pas. Il s'agit des rivières Trois-Pistoles et Rimouski. Enfin, dans la région hydroclimatique du Sud-Est, la corrélation est significative seulement pour la moitié des rivières.

Tableau 4.3

Coefficients de corrélation calculés entre les périodes d'occurrence des débits maximums journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices des épisodes El Niño d'intensité faible à très forte pendant la période 1950-2017

| Code | Rivière | Hiver | | | Printemps | | | |
|-------------------------------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|-----------|--------|-----------------|----------------|
| | | JAS-1 | OND-1 | JFM | JAS-1 | OND-1 | JFM | AMJ |
| Région hydroclimatique du Sud-Est | | | | | | | | |
| SE1 | Châteauguay | 0,038 | -0,064 | -0,058 | -0,018 | 0,041 | -0,059 | -0,222 |
| SE2 | Eaton | 0,208 | 0,038 | 0,084 | -0,090 | 0,073 | 0,008 | -0,115 |
| SE3 | Nicolet SW | 0,388* | 0,327 | 0,439** | -0,187 | -0,212 | -0,246 | -0,026 |
| SE4 | Etchemin | 0,235 | 0,335 | 0,374* | -0,236 | -0,276 | -0,401** | -0,091 |
| SE5 | Beaurivage | 0,052 | 0,163 | 0,198 | -0,112 | -0,209 | -0,267 | -0,005 |
| SE6 | Du Sud | 0,376* | 0,408** | 0,448** | -0,213 | -0,239 | -0,304 | -0,093 |
| Région hydroclimatique de l'Est | | | | | | | | |
| E1 | Ouelle | 0,324 | 0,371* | 0,460** | 0,081 | -0,056 | -0,212 | -0,281 |
| E2 | Du Loup | 0,282 | 0,380* | 0,444** | 0,183 | -0,006 | -0,242 | -0,344* |
| E3 | Trois-Pistoles | 0,282 | 0,309 | 0,225 | -0,036 | -0,025 | -0,166 | -0,170 |
| E4 | Rimouski | 0,121 | 0,085 | 0,118 | 0,207 | 0,138 | -0,119 | -0,358* |
| E5 | Matane | 0,338* | 0,402** | 0,291 | -0,051 | -0,086 | -0,298 | -0,166 |
| E6 | Blanche | 0,273 | 0,336 | 0,413** | 0,180 | 0,095 | -0,077 | -0,199 |
| Région hydroclimatique du Sud-Ouest | | | | | | | | |
| SW1 | De La Petite Nation | 0,128 | 0,306 | 0,454** | -0,044 | -0,023 | -0,070 | -0,001 |
| SW2 | Du Nord | 0,421** | 0,443** | 0,384* | 0,008 | -0,069 | -0,347* | -0,283 |
| SW3 | L'Assomption | 0,350* | 0,432** | 0,353* | 0,091 | 0,047 | -0,236 | -0,302 |
| SW4 | Matawin | 0,262 | 0,417** | 0,396* | -0,048 | 0,027 | -0,046 | -0,032 |
| SW5 | Vermillon | 0,071 | 0,337* | 0,426** | -0,068 | -0,073 | -0,163 | -0,132 |

* = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 10 %.

** = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 5 %.

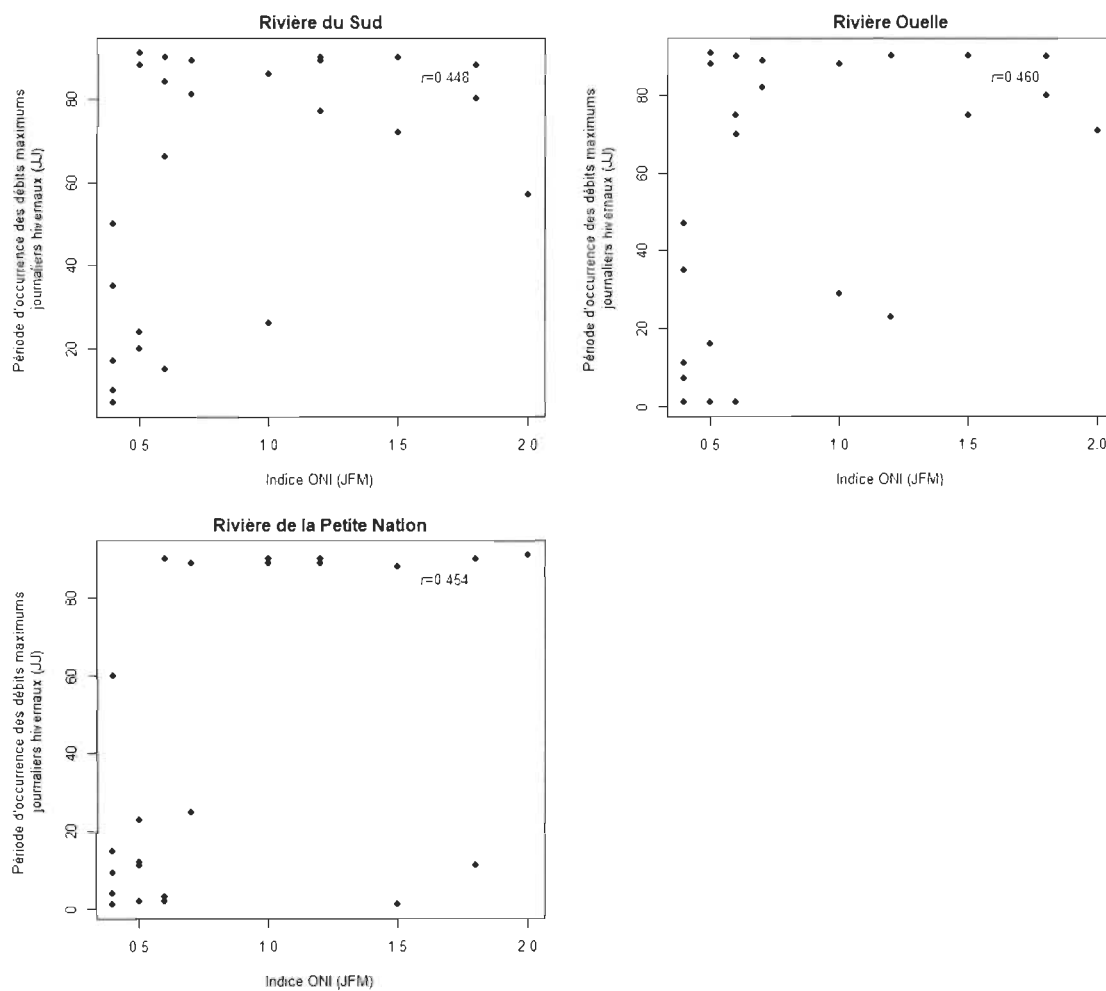


Figure 4.5 Relation entre la période d'occurrence des débits maximums journaliers hivernaux et l'indice ONI lors des épisodes El Niño d'intensité faible à très forte pour la période 1950-2017.

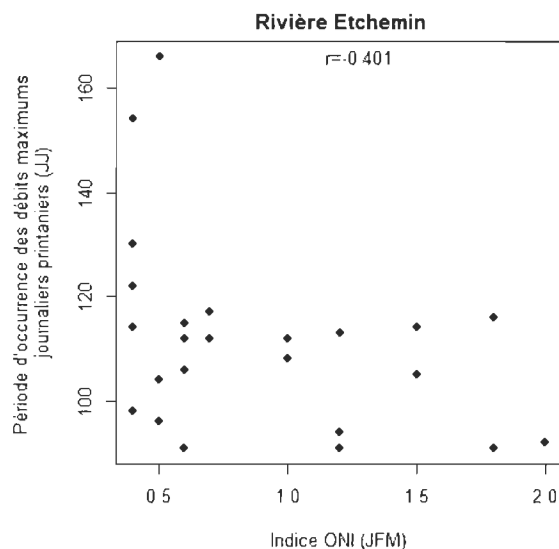


Figure 4.6 Relation entre la période d'occurrence des débits maximums journaliers printaniers et l'indice ONI lors des épisodes El Niño d'intensité faible à très forte pour la période 1950-2017.

4.1.4 Relation entre les débits minimums journaliers saisonniers et les épisodes d'El Niño d'intensité faible à très forte

À l'instar des débits moyens et maximums, la magnitude des débits minimums journaliers tendent à augmenter avec l'intensité des épisodes El Niño aussi bien en hiver qu'au printemps (Figures 4.7 et 4.8). En effet, tous les coefficients de corrélation sont positifs durant les deux saisons dans les trois régions hydroclimatiques (Tableau 4.4). De plus, l'influence d'El Niño se manifeste davantage en hiver qu'au printemps. C'est l'indice hivernal JFM qui est mieux corrélé aux débits minimums journaliers de nombreuses rivières. Sur le plan spatial, contrairement aux débits maximums journaliers, ce sont les rivières de la région hydroclimatique du Sud-Est qui présente majoritairement des corrélations significatives entre les épisodes El Niño et les débits minimums journaliers. Dans la région hydroclimatique de l'Est, seulement le tiers de rivières qui présentent des corrélations significatives et la moitié dans la région hydroclimatique du Sud-Ouest.

Tableau 4.4

Coefficients de corrélation calculés entre les débits minimums journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices des épisodes El Niño d'intensité faible à très forte pendant la période 1950-2017

| Code | Rivière | Hiver | | | Printemps | | | |
|-------------------------------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------|
| | | JAS-1 | OND-1 | JFM | JAS-1 | OND-1 | JFM | AMJ |
| Région hydroclimatique du Sud-Est | | | | | | | | |
| SE1 | Châteauguay | 0,132 | 0,244 | 0,250 | 0,140 | 0,163 | 0,046 | -0,246 |
| SE2 | Eaton | 0,272 | 0,383* | 0,408** | -0,244 | -0,326 | -0,332 | -0,097 |
| SE3 | Nicolet SW | 0,223 | 0,349* | 0,408** | -0,007 | -0,020 | 0,000 | 0,017 |
| SE4 | Etchemin | 0,134 | 0,112 | 0,216 | -0,068 | -0,144 | -0,118 | -0,101 |
| SE5 | Beaurivage | 0,196 | 0,367* | 0,494** | -0,089 | 0,045 | 0,221 | 0,235 |
| SE6 | Du Sud | 0,360* | 0,464** | 0,403** | 0,141 | -0,016 | 0,051 | -0,013 |
| Région hydroclimatique de l'Est | | | | | | | | |
| E1 | Ouelle | 0,086 | 0,049 | 0,266 | 0,138 | 0,013 | -0,051 | -0,058 |
| E2 | Du Loup | -0,214 | 0,092 | 0,292 | 0,053 | 0,234 | 0,108 | 0,094 |
| E3 | Trois-Pistoles | 0,150 | 0,357* | 0,519** | 0,105 | -0,082 | -0,001 | 0,026 |
| E4 | Rimouski | 0,222 | 0,325 | 0,362* | 0,177 | 0,134 | 0,136 | -0,019 |
| E5 | Matane | -0,020 | 0,107 | 0,204 | 0,226 | 0,192 | 0,254 | 0,053 |
| E6 | Blanche | -0,005 | 0,174 | 0,113 | 0,160 | 0,131 | 0,241 | 0,068 |
| Région hydroclimatique du Sud-Ouest | | | | | | | | |
| SW1 | De La Petite Nation | 0,404** | 0,565** | 0,502** | 0,261 | 0,411** | 0,215 | -0,091 |
| SW2 | Du Nord | 0,234 | 0,288 | 0,280 | -0,017 | -0,138 | 0,018 | 0,193 |
| SW3 | L'Assomption | 0,245 | 0,361* | 0,338* | 0,200 | 0,162 | 0,143 | 0,144 |
| SW4 | Matawin | 0,244 | 0,317 | 0,118 | 0,149 | 0,307 | 0,189 | 0,114 |
| SW5 | Vermillon | 0,400** | 0,542** | 0,514** | 0,410** | 0,524** | 0,412** | 0,117 |

* = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 10 %.

** = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 5 %.

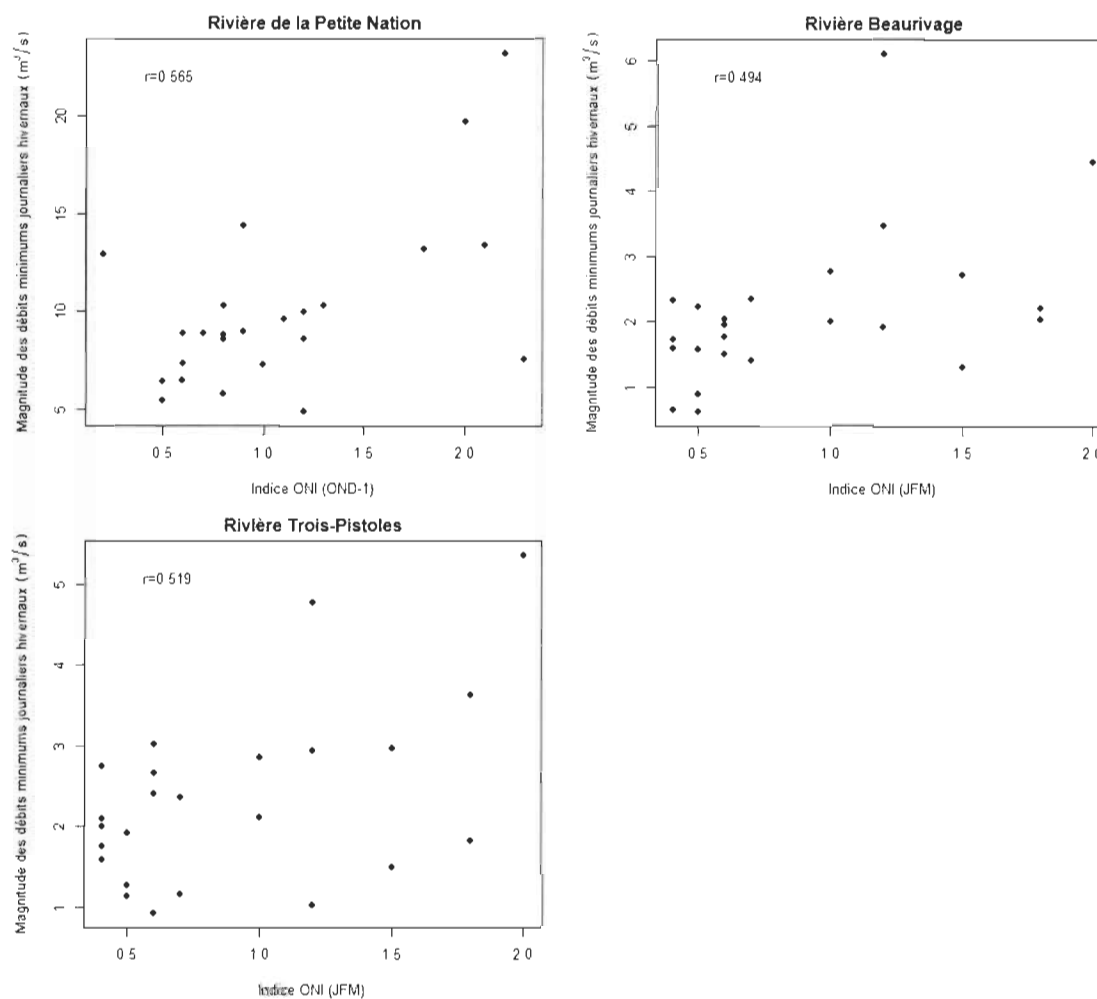


Figure 4.7 Relation entre la magnitude des débits minimums journaliers hivernaux et l'indice ONI lors des épisodes El Niño d'intensité faible à très forte pour la période 1950-2017.

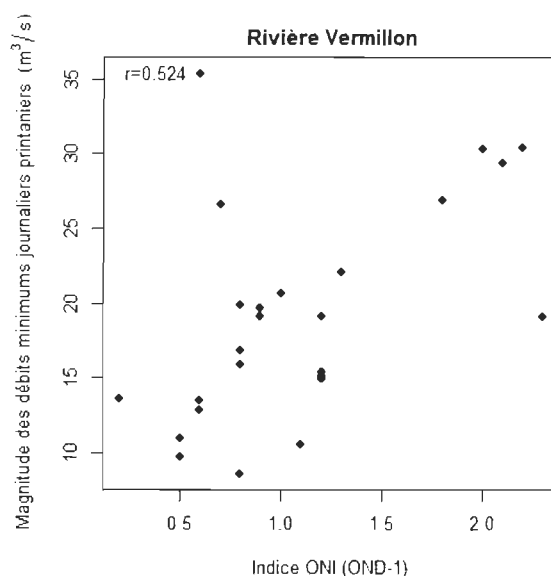


Figure 4.8 Relation entre la magnitude des débits minimums journaliers printaniers et l'indice ONI lors des épisodes El Niño d'intensité faible à très forte pour la période 1950-2017.

4.1.5 Relation entre les périodes d'occurrence des débits minimums journaliers saisonniers et les épisodes d'El Niño d'intensité faible à très forte

Les valeurs des coefficients de corrélation entre les deux variables sont présentées au tableau 4.5. Contrairement aux périodes d'occurrence des débits maximums journaliers, les indices des épisodes El Niño sont globalement peu corrélés aux périodes d'occurrence des débits minimums journaliers. Il existe aussi une nette opposition entre les saisons. En hiver, tous les coefficients de corrélation sont négatifs alors qu'ils sont tous positifs au printemps. Il s'ensuit que contrairement aux périodes d'occurrence des débits maximums journaliers, la hausse d'intensité des épisodes El Niño provoque une occurrence hâtive des débits minimums journaliers en hiver, mais, en revanche, une occurrence tardive des débits minimums journaliers au printemps (Figures 4.9 et 4.10). Sur le plan spatial, les indices des épisodes El Niño sont mieux corrélés aux périodes d'occurrence des débits minimums journaliers dans la région hydroclimatique de l'Est. Cette corrélation est inexistante dans la région hydroclimatique du Sud-Ouest située en rive nord. En effet, aucun coefficient de corrélation n'est statistiquement significatif dans cette région hydroclimatique.

Tableau 4.5

Coefficients de corrélation calculés entre les périodes d'occurrence des débits minimums journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices des épisodes El Niño d'intensité faible à très forte pendant la période 1950-2017

| Code | Rivière | Hiver | | | Printemps | | | |
|-------------------------------------|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|----------------|----------------|--------|
| | | JAS-1 | OND-1 | JFM | JAS-1 | OND-1 | JFM | AMJ |
| Région hydroclimatique du Sud-Est | | | | | | | | |
| SE1 | Châteauguay | -0,233 | -0,109 | -0,096 | 0,172 | 0,172 | 0,200 | -0,038 |
| SE2 | Eaton | -0,176 | -0,138 | 0,073 | 0,267 | 0,170 | 0,033 | -0,218 |
| SE3 | Nicolet SW | -0,407** | -0,209 | -0,038 | 0,237 | 0,159 | 0,017 | -0,247 |
| SE4 | Etchemin | -0,145 | -0,117 | -0,221 | 0,311 | 0,296 | 0,362* | 0,156 |
| SE5 | Beaurivage | -0,292 | -0,067 | 0,042 | 0,127 | 0,243 | 0,054 | 0,047 |
| SE6 | Du Sud | -0,292 | -0,281 | -0,347* | 0,354* | 0,334 | 0,358* | 0,033 |
| Région hydroclimatique de l'Est | | | | | | | | |
| E1 | Ouelle | -0,394* | -0,321 | -0,119 | 0,221 | 0,283 | 0,329 | 0,169 |
| E2 | Du Loup | -0,411** | -0,515** | -0,518** | 0,224 | 0,313 | 0,349* | 0,228 |
| E3 | Trois-Pistoles | -0,209 | -0,226 | -0,191 | 0,206 | 0,388* | 0,379* | 0,160 |
| E4 | Rimouski | -0,065 | -0,131 | -0,209 | 0,292 | 0,479** | 0,480** | 0,187 |
| E5 | Matane | -0,348* | -0,312 | -0,312 | 0,323 | 0,354* | 0,346* | 0,044 |
| E6 | Blanche | -0,077 | -0,034 | 0,026 | 0,231 | 0,309 | 0,359* | 0,187 |
| Région hydroclimatique du Sud-Ouest | | | | | | | | |
| SW1 | De La Petite Nation | -0,178 | -0,244 | -0,213 | 0,169 | 0,328 | 0,281 | 0,097 |
| SW2 | Du Nord | -0,118 | -0,186 | -0,166 | 0,236 | 0,146 | 0,056 | -0,198 |
| SW3 | L'Assomption | -0,222 | -0,302 | -0,311 | 0,269 | 0,297 | 0,246 | 0,003 |
| SW4 | Matawin | -0,019 | -0,055 | -0,019 | 0,109 | 0,270 | 0,280 | -0,027 |
| SW5 | Vermillon | -0,160 | -0,296 | -0,251 | 0,255 | 0,301 | 0,329 | -0,058 |

* = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 10 %.

** = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 5 %.

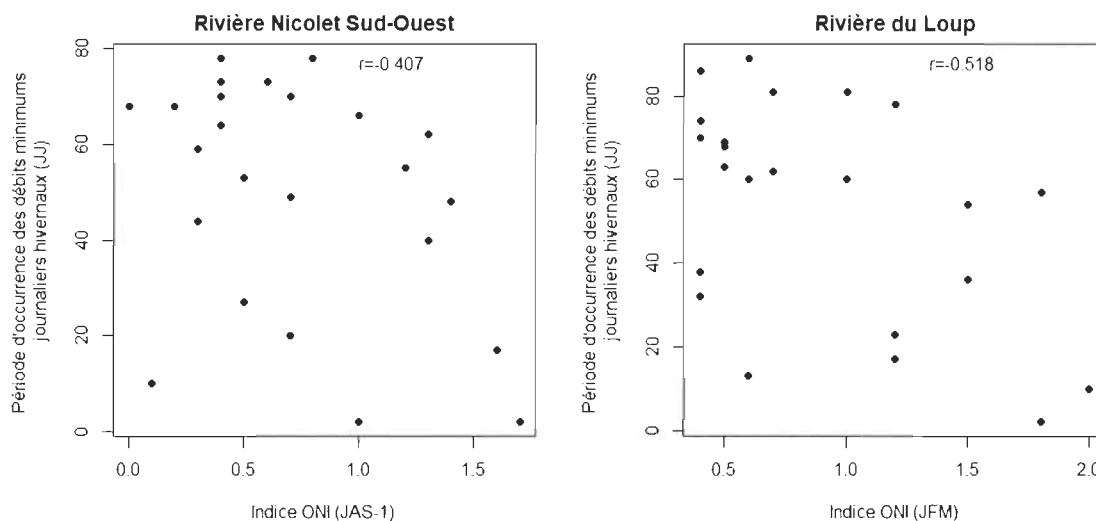


Figure 4.9 Relation entre la période d'occurrence des débits minimums journaliers hivernaux et l'indice ONI lors des épisodes El Niño d'intensité faible à très forte pour la période 1950-2017.

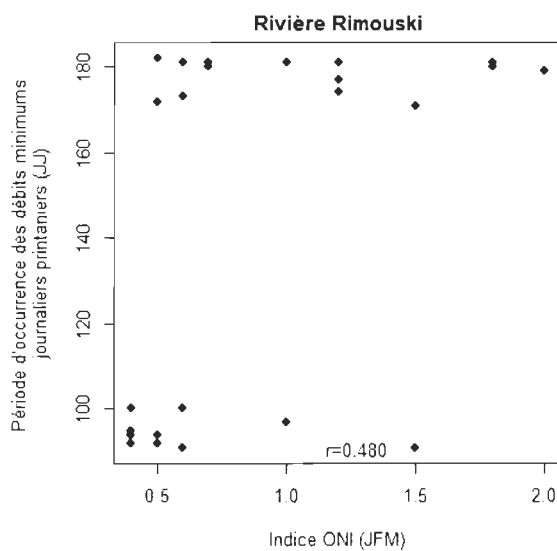


Figure 4.10 Relation entre la période d'occurrence des débits minimums journaliers printaniers et l'indice ONI lors des épisodes El Niño d'intensité faible à très forte pour la période 1950-2017.

4.1.6 Relation entre les indices de la variabilité de l'écoulement et les épisodes d'El Niño d'intensité faible à très forte

Peu de relations significatives sont observées pour les coefficients de variation et coefficient d'immodération (Tableaux 4.6 et 4.7). C'est encore en hiver que l'influence des épisodes El Niño se manifeste plus qu'au printemps. Elle se manifeste particulièrement dans la région hydroclimatique du Sud-Ouest. Dans les deux autres régions hydroclimatiques, les deux indices de variabilité d'écoulement sont très peu corrélés aux épisodes El Niño. Enfin, il importe de noter que tous les coefficients de corrélation statistiquement significatifs sont positifs. Ainsi, la hausse de l'intensité des épisodes El Niño provoque globalement une forte variabilité interjournalière des débits et une forte amplitude saisonnière aussi bien en hiver qu'au printemps (Figures 4.11, 4.12 et 4.13). Enfin, encore une fois, c'est l'indice hivernal JFM des épisodes El Niño qui est mieux corrélé aux deux indices de variabilité de l'écoulement.

Tableau 4.6

Coefficients de corrélation calculés entre les coefficients de variation saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices des épisodes El Niño d'intensité faible à très forte pendant la période 1950-2017

| Code | Rivière | Hiver | | | Printemps | | | |
|-------------------------------------|---------------------|---------------|---------------|----------------|---------------|--------|---------------|----------------|
| | | JAS-1 | OND-1 | JFM | JAS-1 | OND-1 | JFM | AMJ |
| Région hydroclimatique du Sud-Est | | | | | | | | |
| SE1 | Châteauguay | 0,169 | 0,147 | 0,133 | 0,209 | 0,089 | 0,114 | 0,116 |
| SE2 | Eaton | 0,027 | 0,064 | 0,023 | 0,353* | 0,196 | 0,209 | -0,056 |
| SE3 | Nicolet SW | 0,142 | 0,231 | 0,203 | 0,261 | 0,126 | 0,201 | 0,075 |
| SE4 | Etchemin | 0,055 | 0,190 | 0,222 | 0,017 | 0,137 | 0,376* | 0,334 |
| SE5 | Beaurivage | 0,063 | 0,183 | 0,229 | -0,048 | -0,013 | 0,196 | 0,196 |
| SE6 | Du Sud | 0,061 | 0,154 | 0,247 | -0,209 | 0,051 | 0,288 | 0,426** |
| Région hydroclimatique de l'Est | | | | | | | | |
| E1 | Ouelle | 0,155 | 0,206 | 0,137 | -0,226 | 0,028 | 0,297 | 0,351* |
| E2 | Du Loup | 0,358* | 0,377* | 0,311 | -0,127 | 0,084 | 0,300 | 0,329 |
| E3 | Trois-Pistoles | -0,002 | 0,065 | 0,070 | -0,277 | -0,024 | 0,110 | 0,268 |
| E4 | Rimouski | 0,002 | 0,067 | 0,181 | -0,249 | -0,044 | 0,162 | 0,274 |
| E5 | Matane | 0,026 | 0,067 | 0,197 | -0,152 | 0,042 | 0,041 | 0,125 |
| E6 | Blanche | 0,056 | 0,051 | 0,104 | -0,188 | -0,007 | 0,028 | 0,127 |
| Région hydroclimatique du Sud-Ouest | | | | | | | | |
| SW1 | De La Petite Nation | -0,146 | 0,035 | 0,142 | -0,063 | -0,063 | 0,048 | 0,086 |
| SW2 | Du Nord | 0,070 | 0,267 | 0,391* | -0,070 | -0,144 | -0,070 | -0,015 |
| SW3 | L'Assomption | -0,064 | 0,151 | 0,341* | -0,194 | -0,113 | -0,017 | 0,052 |
| SW4 | Matawin | 0,168 | 0,299 | 0,439** | -0,093 | 0,085 | 0,161 | 0,138 |
| SW5 | Vermillon | 0,101 | 0,286 | 0,292 | -0,245 | -0,104 | 0,072 | 0,183 |

* = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 10 %.

** = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 5 %.

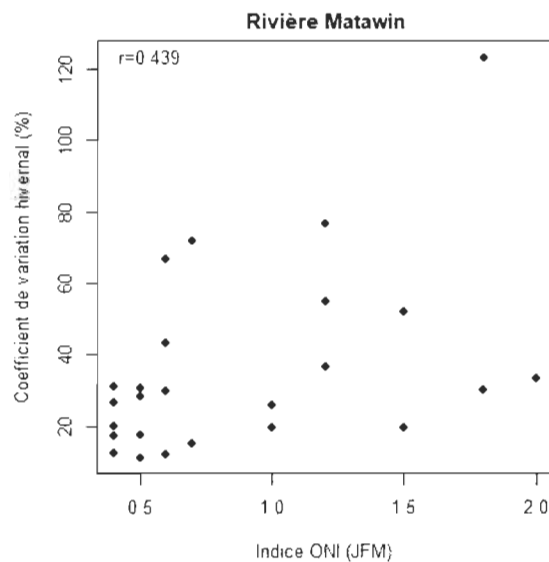


Figure 4.11 Relation entre les coefficients de variation hivernaux et l'indice ONI lors des épisodes El Niño d'intensité faible à très forte pour la période 1950-2017.

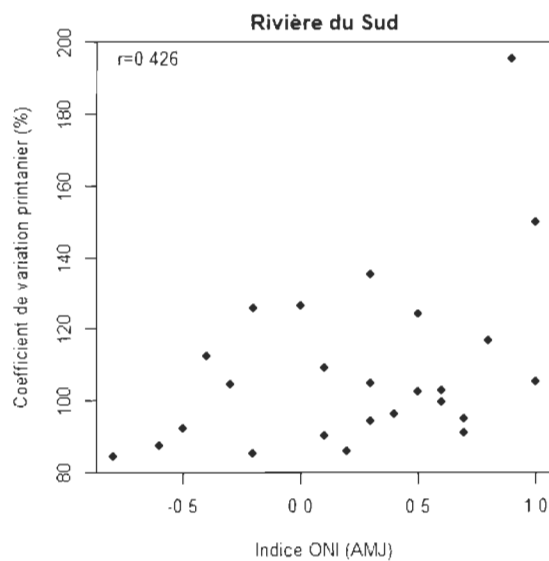


Figure 4.12 Relation entre les coefficients de variation printaniers et l'indice ONI lors des épisodes El Niño d'intensité faible à très forte pour la période 1950-2017.

Tableau 4.7

Coefficients de corrélation calculés entre les coefficients d'immodération saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices des épisodes El Niño d'intensité faible à très forte pendant la période 1950-2017

| Code | Rivière | Hiver | | | Printemps | | | |
|-------------------------------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|-----------|--------|---------------|---------------|
| | | JAS-1 | OND-1 | JFM | JAS-1 | OND-1 | JFM | AMJ |
| Région hydroclimatique du Sud-Est | | | | | | | | |
| SE1 | Châteauguay | 0,284 | 0,308 | 0,213 | 0,093 | 0,086 | -0,007 | -0,019 |
| SE2 | Eaton | -0,141 | -0,083 | -0,071 | 0,220 | 0,141 | 0,056 | -0,162 |
| SE3 | Nicolet SW | 0,220 | 0,307 | 0,197 | -0,055 | -0,151 | -0,103 | 0,018 |
| SE4 | Etchemin | 0,219 | 0,337 | 0,229 | 0,030 | 0,174 | 0,343* | 0,355* |
| SE5 | Beaurivage | 0,124 | 0,255 | 0,228 | -0,079 | -0,171 | -0,162 | -0,109 |
| SE6 | Du Sud | 0,041 | 0,164 | 0,241 | -0,148 | -0,029 | 0,141 | 0,285 |
| Région hydroclimatique de l'Est | | | | | | | | |
| E1 | Ouelle | 0,273 | 0,386* | 0,321 | -0,177 | 0,015 | 0,315 | 0,353* |
| E2 | Du Loup | 0,475** | 0,422** | 0,310 | 0,107 | 0,041 | 0,275 | 0,189 |
| E3 | Trois-Pistoles | 0,069 | 0,146 | 0,198 | -0,107 | 0,249 | 0,250 | 0,158 |
| E4 | Rimouski | 0,069 | 0,145 | 0,294 | -0,054 | 0,155 | 0,271 | 0,276 |
| E5 | Matane | 0,058 | 0,124 | 0,250 | -0,314 | -0,298 | -0,285 | -0,061 |
| E6 | Blanche | 0,243 | 0,171 | 0,305 | -0,228 | -0,149 | -0,070 | 0,170 |
| Région hydroclimatique du Sud-Ouest | | | | | | | | |
| SW1 | De La Petite Nation | -0,016 | 0,123 | 0,231 | 0,032 | -0,018 | 0,068 | 0,132 |
| SW2 | Du Nord | 0,246 | 0,402** | 0,461** | 0,299 | 0,306 | 0,212 | 0,020 |
| SW3 | L'Assomption | 0,092 | 0,251 | 0,392* | 0,009 | 0,055 | -0,001 | 0,002 |
| SW4 | Matawin | 0,335 | 0,417** | 0,488** | 0,038 | 0,050 | 0,073 | 0,081 |
| SW5 | Vermillon | 0,203 | 0,353* | 0,365* | -0,223 | -0,201 | -0,179 | 0,034 |

* = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 10 %.

** = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 5 %.

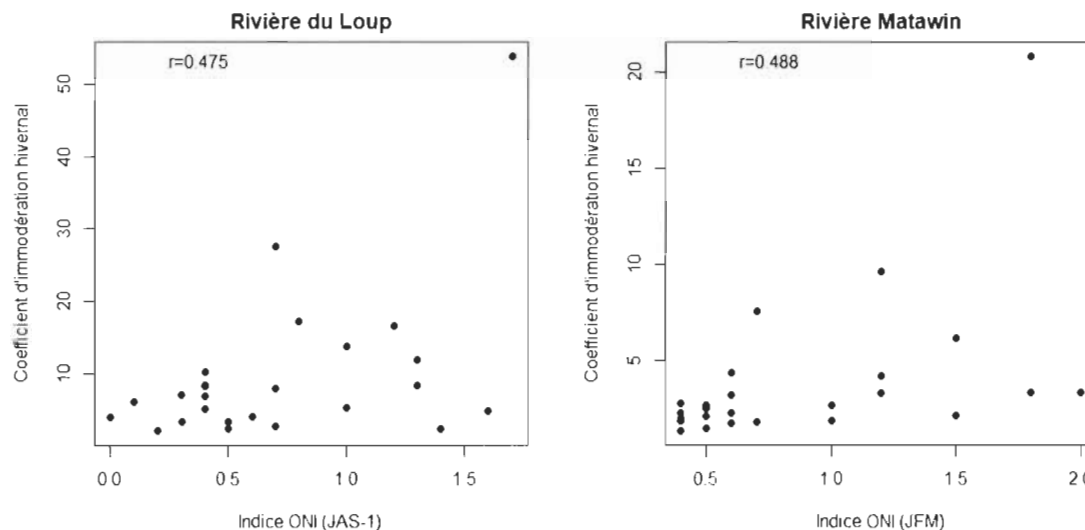


Figure 4.13 Relation entre les coefficients d'immodération hivernaux et l'indice ONI lors des épisodes El Niño d'intensité faible à très forte pour la période 1950-2017.

4.2 Analyse de l'influence des épisodes El Niño d'intensité modérée à très forte

Dans cette section, on a exclu les épisodes El Niño de faible intensité afin de pouvoir vérifier si ces épisodes peuvent « brouiller » l'influence d'El Niño sur les caractéristiques des débits en hiver et au printemps.

4.2.1 Relation entre les débits moyens journaliers et les épisodes El Niño d'intensité modérée à très forte

Les valeurs des coefficients de corrélation sont présentées au tableau 4.8. Il ressort de ce tableau trois faits significatifs suivants :

- Par rapport au tableau 4.1, les valeurs des coefficients de corrélation ont globalement augmenté dans les trois régions hydroclimatiques. Cette hausse confirme l'influence de l'intensité des épisodes El Niño sur les débits moyens journaliers. Ces relations restent toujours positives aussi bien en hiver qu'au printemps (Figures 4.14 et 4.15).

- Dans la région hydroclimatique du Sud-Est, le nombre de rivières, dont les débits moyens journaliers corrélés aux indices des épisodes El Niño, a augmenté.
- Dans la région hydroclimatique du Sud-Ouest, le nombre de rivières, dont les débits moyens journaliers corrélés aux indices des épisodes El Niño, a augmenté au printemps. Il s'ensuit que les épisodes d'El Niño de faible intensité affaiblissent l'influence de cet événement au printemps dans cette région hydroclimatique contrairement aux deux autres régions.

Tableau 4.8

Coefficients de corrélation calculés les débits moyens journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les épisodes El Niño d'intensité modérée à très forte pendant la période 1950-2017

| Code | Rivière | Hiver | | | Printemps | | | |
|-------------------------------------|---------------------|--------|----------------|----------------|---------------|----------------|---------------|--------|
| | | JAS-1 | OND-1 | JFM | JAS-1 | OND-1 | JFM | AMJ |
| Région hydroclimatique du Sud-Est | | | | | | | | |
| SE1 | Châteauguay | 0,264 | 0,508* | 0,260 | 0,123 | 0,164 | 0,367 | 0,269 |
| SE2 | Eaton | -0,062 | 0,232 | 0,120 | -0,399 | -0,411 | -0,161 | 0,213 |
| SE3 | Nicolet SW | 0,283 | 0,584** | 0,320 | -0,196 | -0,278 | -0,224 | 0,175 |
| SE4 | Etchemin | 0,278 | 0,562** | 0,273 | -0,098 | -0,099 | -0,015 | 0,176 |
| SE5 | Beaurivage | 0,258 | 0,548** | 0,357 | -0,061 | 0,021 | 0,128 | 0,170 |
| SE6 | Du Sud | 0,418 | 0,648** | 0,333 | -0,032 | 0,042 | 0,139 | 0,234 |
| Région hydroclimatique de l'Est | | | | | | | | |
| E1 | Ouelle | 0,182 | 0,374 | 0,316 | 0,099 | 0,274 | 0,314 | 0,290 |
| E2 | Du Loup | 0,129 | 0,402 | 0,426 | 0,090 | 0,241 | 0,318 | 0,305 |
| E3 | Trois-Pistoles | 0,075 | 0,536** | 0,689** | -0,106 | -0,050 | 0,128 | 0,225 |
| E4 | Rimouski | 0,214 | 0,542** | 0,597** | -0,058 | -0,109 | -0,085 | -0,148 |
| E5 | Matane | 0,189 | 0,374 | 0,651** | -0,244 | -0,142 | -0,122 | -0,067 |
| E6 | Blanche | 0,320 | 0,413 | 0,550** | -0,041 | -0,086 | -0,148 | -0,099 |
| Région hydroclimatique du Sud-Ouest | | | | | | | | |
| SW1 | De La Petite Nation | 0,284 | 0,569** | 0,461* | 0,350 | 0,495* | 0,467* | 0,240 |
| SW2 | Du Nord | 0,229 | 0,640** | 0,480* | 0,148 | 0,136 | 0,107 | 0,226 |
| SW3 | L'Assomption | 0,157 | 0,513* | 0,372 | 0,347 | 0,464* | 0,352 | 0,315 |
| SW4 | Matawin | 0,168 | 0,409 | 0,209 | 0,455* | 0,586** | 0,490* | 0,303 |
| SW5 | Vermillon | 0,081 | 0,355 | 0,309 | 0,312 | 0,545** | 0,447* | 0,271 |

* = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 10 %.

** = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 5 %.

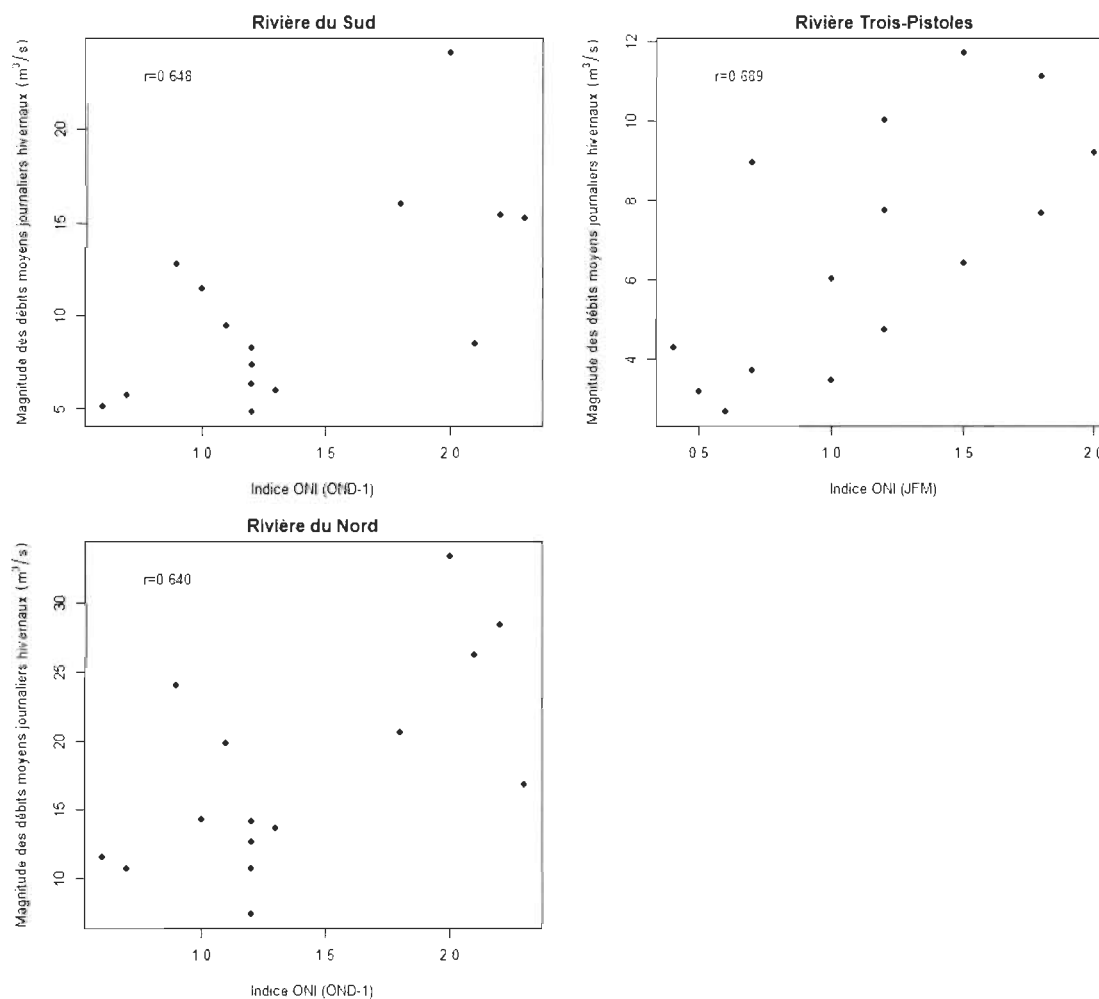


Figure 4.14 Relation entre la magnitude des débits moyens journaliers hivernaux et l'indice ONI lors des épisodes El Niño d'intensité modérée à très forte pour la période 1950-2017.

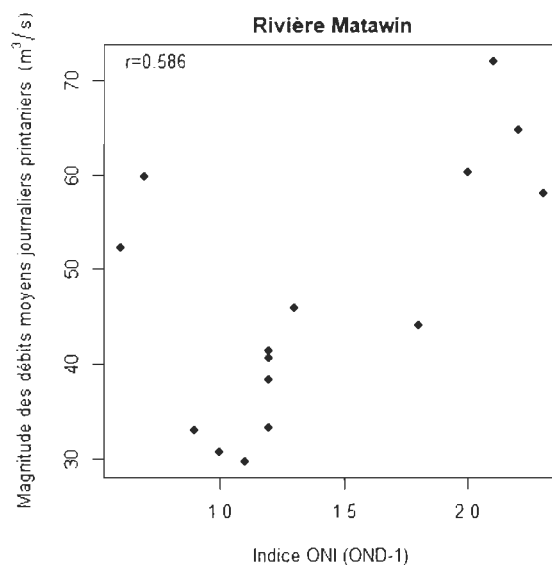


Figure 4.15 Relation entre la magnitude des débits moyens journaliers printaniers et l'indice ONI lors des épisodes El Niño d'intensité modérée à très forte pour la période 1950-2017.

4.2.2 Relation entre les débits maximums journaliers et les épisodes El Niño d'intensité modérée à très forte

L'influence printanière des épisodes El Niño se confirme dans les trois régions hydroclimatiques et plus particulièrement dans la région du Sud-Ouest (Tableau 4.9). Cependant, on note un affaiblissement de l'influence de ces épisodes dans les deux régions hydroclimatiques situées en rive sud. L'ensemble des relations sont positives (Figures 4.16 et 4.17).

Tableau 4.9

Coefficients de corrélation calculés les débits maximums journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les épisodes El Niño d'intensité modérée à très forte pendant la période 1950-2017

| Code | Rivière | Hiver | | | Printemps | | | |
|-------------------------------------|---------------------|--------|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| | | JAS-1 | OND-1 | JFM | JAS-1 | OND-1 | JFM | AMJ |
| Région hydroclimatique du Sud-Est | | | | | | | | |
| SE1 | Châteauguay | 0,373 | 0,462* | 0,376 | 0,495* | 0,452* | 0,392 | 0,133 |
| SE2 | Eaton | 0,109 | 0,327 | 0,102 | -0,273 | -0,435 | -0,250 | -0,015 |
| SE3 | Nicolet SW | 0,191 | 0,458* | 0,217 | -0,013 | -0,121 | 0,056 | 0,170 |
| SE4 | Etchemin | 0,060 | 0,350 | 0,295 | -0,226 | 0,007 | 0,427 | 0,584** |
| SE5 | Beaurivage | 0,111 | 0,383 | 0,344 | -0,122 | 0,015 | 0,427 | 0,333 |
| SE6 | Du Sud | 0,096 | 0,265 | 0,295 | -0,267 | -0,009 | 0,373 | 0,551** |
| Région hydroclimatique de l'Est | | | | | | | | |
| E1 | Ouelle | 0,077 | 0,323 | 0,324 | -0,336 | 0,094 | 0,483 | 0,626 |
| E2 | Du Loup | 0,281 | 0,501* | 0,503* | -0,205 | 0,104 | 0,524** | 0,652** |
| E3 | Trois-Pistoles | 0,034 | 0,312 | 0,413 | -0,409 | -0,089 | 0,327 | 0,659** |
| E4 | Rimouski | 0,074 | 0,248 | 0,407 | -0,305 | -0,201 | 0,283 | 0,434 |
| E5 | Matane | -0,032 | 0,158 | 0,319 | -0,361 | -0,202 | 0,142 | 0,380 |
| E6 | Blanche | 0,436 | 0,476* | 0,512* | -0,266 | -0,257 | -0,084 | 0,125 |
| Région hydroclimatique du Sud-Ouest | | | | | | | | |
| SW1 | De La Petite Nation | 0,433 | 0,712** | 0,642** | 0,311 | 0,394 | 0,496* | 0,356 |
| SW2 | Du Nord | 0,252 | 0,577** | 0,552** | 0,167 | 0,189 | 0,360 | 0,454* |
| SW3 | L'Assomption | 0,245 | 0,590** | 0,562** | 0,296 | 0,537** | 0,647** | 0,545** |
| SW4 | Matawin | 0,318 | 0,490* | 0,449* | 0,393 | 0,655** | 0,724** | 0,471* |
| SW5 | Vermillon | 0,216 | 0,491* | 0,417 | 0,131 | 0,425 | 0,543** | 0,497* |

* = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 10 %.

** = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 5 %.

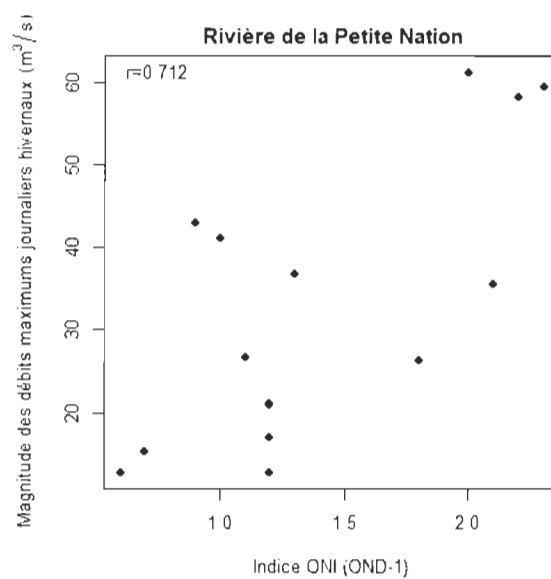


Figure 4.16 Relation entre la magnitude des débits maximums journaliers hivernaux et l'indice ONI lors des épisodes El Niño d'intensité modérée à très forte pour la période 1950-2017.

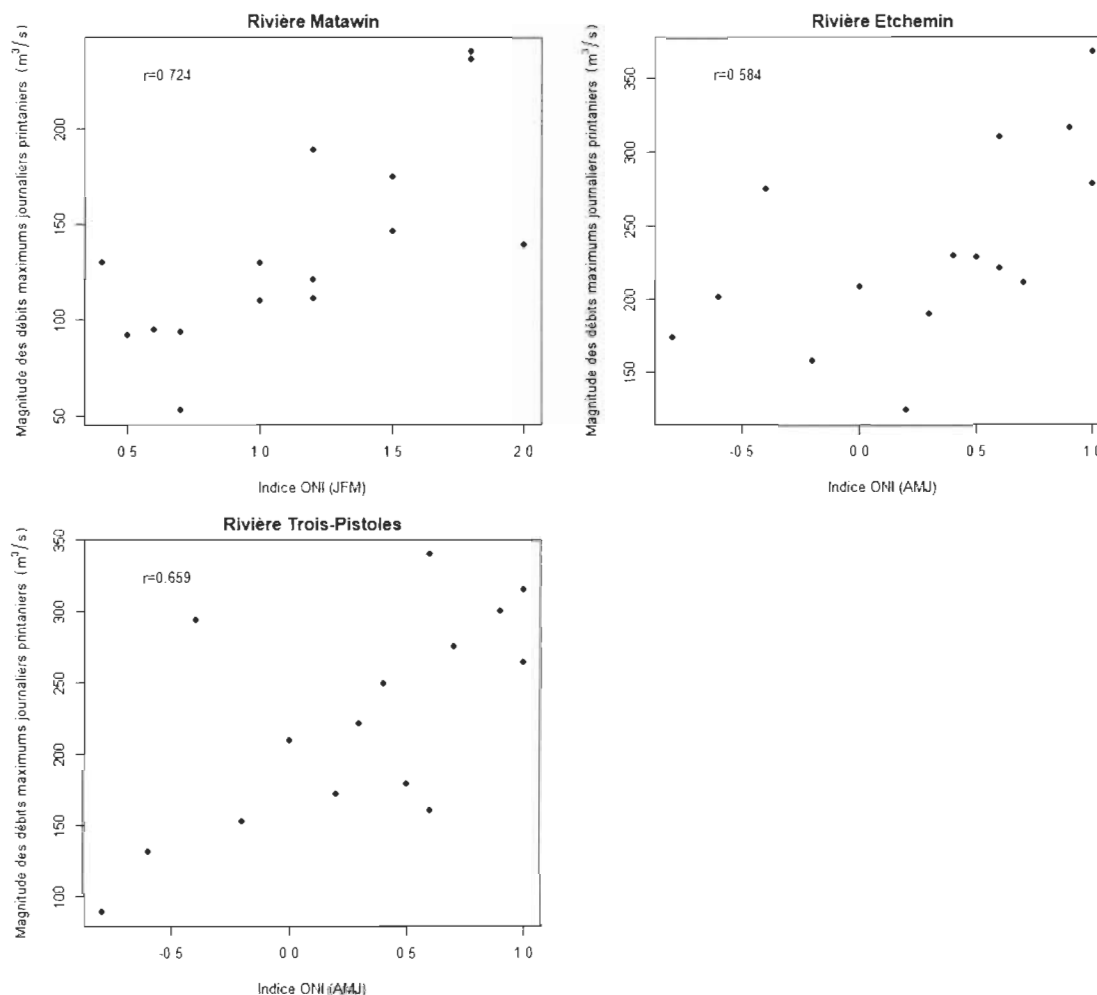


Figure 4.17 Relation entre la magnitude des débits maximums journaliers printaniers et l'indice ONI lors des épisodes El Niño d'intensité modérée à très forte pour la période 1950-2017.

4.2.3 Relation entre les périodes d'occurrence des débits maximums journaliers et les épisodes El Niño d'intensité modérée à très forte

Les valeurs des coefficients de corrélation calculés entre les deux variables sont présentées dans le tableau 4.10. Il ressort de ce tableau que les périodes d'occurrence de nombreuses rivières dans les trois régions hydroclimatiques sont très peu corrélées aux épisodes El Niño. En effet, dans chacune des régions hydroclimatiques du Sud-Est et du Sud-Ouest, deux rivières seulement sont corrélées aux épisodes El Niño. Dans la première région, cette corrélation est observée seulement au printemps alors que dans la

seconde région, elle est observée seulement en hiver. Au printemps, la corrélation est négative alors qu'elle est positive en hiver (Figure 4.18).

Tableau 4.10

Coefficients de corrélation calculés de la période d'occurrence des débits maximums journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les épisodes El Niño d'intensité modérée à très forte pendant la période 1950-2017

| Code | Rivière | Hiver | | | Printemps | | | |
|-------------------------------------|---------------------|--------|---------|--------|-----------|--------|---------|--------|
| | | JAS-1 | OND-1 | JFM | JAS-1 | OND-1 | JFM | AMJ |
| Région hydroclimatique du Sud-Est | | | | | | | | |
| SE1 | Châteauguay | 0,275 | 0,085 | 0,083 | -0,350 | -0,275 | -0,345 | -0,244 |
| SE2 | Eaton | 0,165 | -0,211 | -0,183 | -0,275 | -0,025 | -0,110 | -0,125 |
| SE3 | Nicolet SW | 0,310 | 0,286 | 0,335 | -0,228 | -0,224 | -0,388 | -0,057 |
| SE4 | Etchemin | -0,101 | 0,140 | 0,072 | -0,263 | -0,334 | -0,461* | 0,044 |
| SE5 | Beaurivage | -0,241 | -0,081 | -0,013 | -0,373 | -0,398 | -0,463* | 0,074 |
| SE6 | Du Sud | 0,284 | 0,381 | 0,236 | 0,003 | -0,009 | -0,192 | -0,010 |
| Région hydroclimatique de l'Est | | | | | | | | |
| E1 | Ouelle | 0,135 | 0,244 | 0,288 | 0,233 | -0,083 | -0,265 | -0,224 |
| E2 | Du Loup | -0,046 | 0,215 | 0,251 | 0,266 | -0,111 | -0,266 | -0,230 |
| E3 | Trois-Pistoles | 0,302 | 0,365 | 0,116 | -0,125 | -0,140 | -0,138 | 0,027 |
| E4 | Rimouski | 0,119 | 0,088 | 0,006 | 0,238 | 0,080 | -0,209 | -0,395 |
| E5 | Matane | 0,462* | 0,583** | 0,243 | 0,123 | -0,061 | -0,318 | -0,188 |
| E6 | Blanche | 0,186 | 0,318 | 0,335 | 0,369 | 0,148 | 0,022 | -0,136 |
| Région hydroclimatique du Sud-Ouest | | | | | | | | |
| SW1 | De La Petite Nation | -0,086 | 0,243 | 0,385 | 0,027 | 0,066 | 0,196 | 0,294 |
| SW2 | Du Nord | 0,099 | 0,201 | -0,026 | 0,034 | -0,132 | -0,380 | -0,209 |
| SW3 | L'Assomption | 0,312 | 0,492* | 0,214 | 0,213 | 0,099 | -0,145 | -0,132 |
| SW4 | Matawin | 0,275 | 0,611** | 0,493* | -0,119 | -0,002 | 0,086 | 0,227 |
| SW5 | Vermillon | -0,230 | 0,219 | 0,250 | -0,097 | -0,061 | -0,063 | 0,068 |

* = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 10 %.

** = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 5 %.

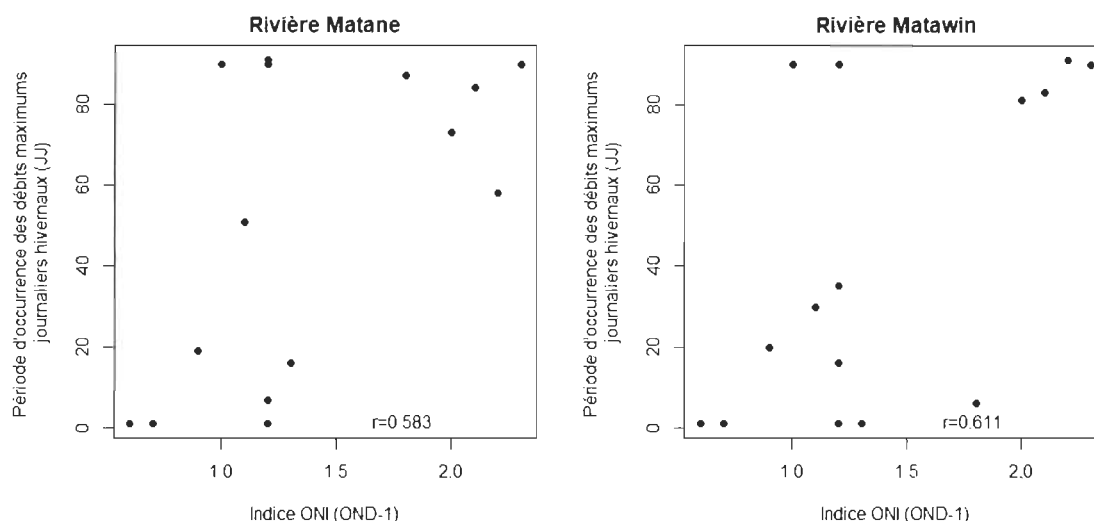


Figure 4.18 Relation entre la période d'occurrence des débits maximums journaliers hivernaux et l'indice ONI lors des épisodes El Niño d'intensité modérée à très forte pour la période 1950-2017.

4.2.4 Relation entre les débits minimums journaliers et les épisodes El Niño d'intensité modérée à très forte

Le nombre des rivières dont les débits minimums journaliers sont corrélés aux épisodes El Niño a augmenté par rapport au tableau 4.4 dans la région hydroclimatique du Sud-Est, mais, en revanche, a diminué dans les autres deux autres régions hydroclimatiques (Tableau 4.11). Cependant, dans les trois régions hydroclimatiques, ce nombre reste plus élevé en hiver qu'au printemps. Toutes ces corrélations sont positives (Figures 4.19 et 4.20). Dans la région hydroclimatique du Sud-Ouest, c'est l'indice automnal OND-1 qui devient le mieux corrélé aux débits moyens journaliers en hiver.

Tableau 4.11

Coefficients de corrélation calculés entre les débits minimums journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les épisodes El Niño d'intensité modérée à très forte pendant la période 1950-2017

| Code | Rivière | Hiver | | | Printemps | | | |
|-------------------------------------|---------------------|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------|
| | | JAS-1 | OND-1 | JFM | JAS-1 | OND-1 | JFM | AMJ |
| Région hydroclimatique du Sud-Est | | | | | | | | |
| SE1 | Châteauguay | 0,073 | 0,238 | 0,247 | -0,028 | 0,091 | -0,001 | -0,163 |
| SE2 | Eaton | 0,030 | 0,217 | 0,305 | -0,230 | -0,298 | -0,251 | 0,037 |
| SE3 | Nicolet SW | 0,243 | 0,442* | 0,384 | -0,174 | -0,202 | -0,175 | 0,002 |
| SE4 | Etchemin | 0,282 | 0,325 | 0,197 | -0,090 | -0,087 | 0,062 | 0,237 |
| SE5 | Beaurivage | -0,006 | 0,241 | 0,390 | -0,109 | -0,018 | 0,302 | 0,241 |
| SE6 | Du Sud | 0,291 | 0,417 | 0,223 | 0,098 | -0,092 | 0,110 | 0,170 |
| Région hydroclimatique de l'Est | | | | | | | | |
| E1 | Ouelle | 0,048 | 0,012 | 0,201 | 0,130 | -0,109 | -0,015 | 0,235 |
| E2 | Du Loup | -0,144 | 0,271 | 0,477* | 0,135 | 0,069 | -0,113 | 0,055 |
| E3 | Trois-Pistoles | 0,030 | 0,356 | 0,593** | 0,279 | 0,064 | 0,318 | 0,284 |
| E4 | Rimouski | 0,121 | 0,356 | 0,466* | 0,379 | 0,360 | 0,388 | 0,063 |
| E5 | Matane | 0,011 | 0,176 | 0,356 | 0,555** | 0,593** | 0,627** | 0,220 |
| E6 | Blanche | -0,014 | 0,290 | 0,273 | 0,359 | 0,319 | 0,538** | 0,252 |
| Région hydroclimatique du Sud-Ouest | | | | | | | | |
| SW1 | De La Petite Nation | 0,340 | 0,585** | 0,406 | 0,059 | 0,275 | 0,063 | 0,029 |
| SW2 | Du Nord | 0,366 | 0,501* | 0,355 | -0,110 | -0,128 | 0,035 | 0,246 |
| SW3 | L'Assomption | 0,378 | 0,528** | 0,369 | 0,057 | 0,103 | 0,107 | 0,371 |
| SW4 | Matawin | 0,411 | 0,512* | 0,070 | 0,233 | 0,576** | 0,406 | 0,388 |
| SW5 | Vermillon | 0,208 | 0,390 | 0,326 | 0,411 | 0,584** | 0,432 | 0,293 |

* = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 10 %.

** = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 5 %.

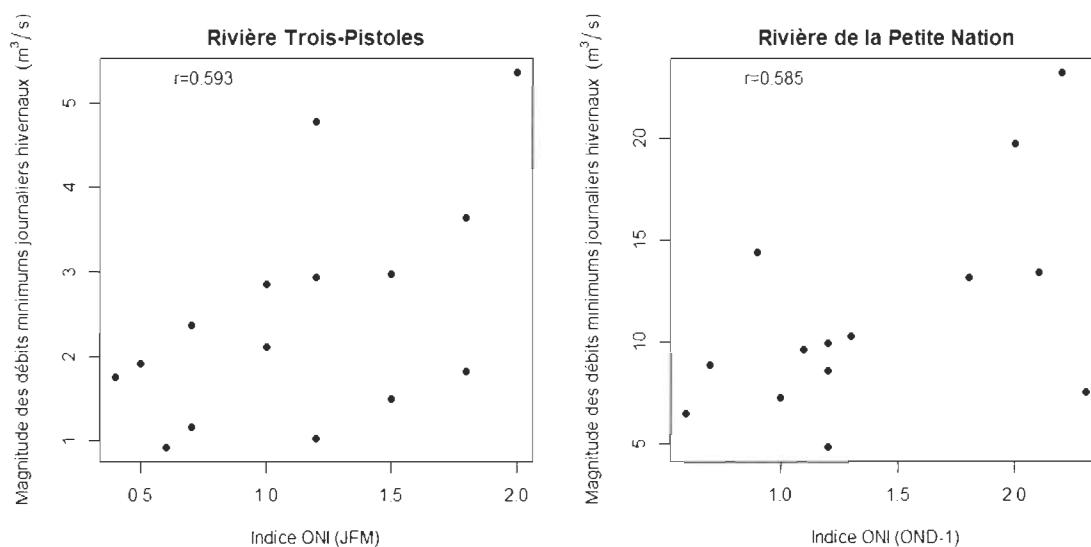


Figure 4.19 Relation entre la magnitude des débits minimums journaliers hivernaux et l'indice ONI lors des épisodes El Niño d'intensité modérée à très forte pour la période 1950-2017.

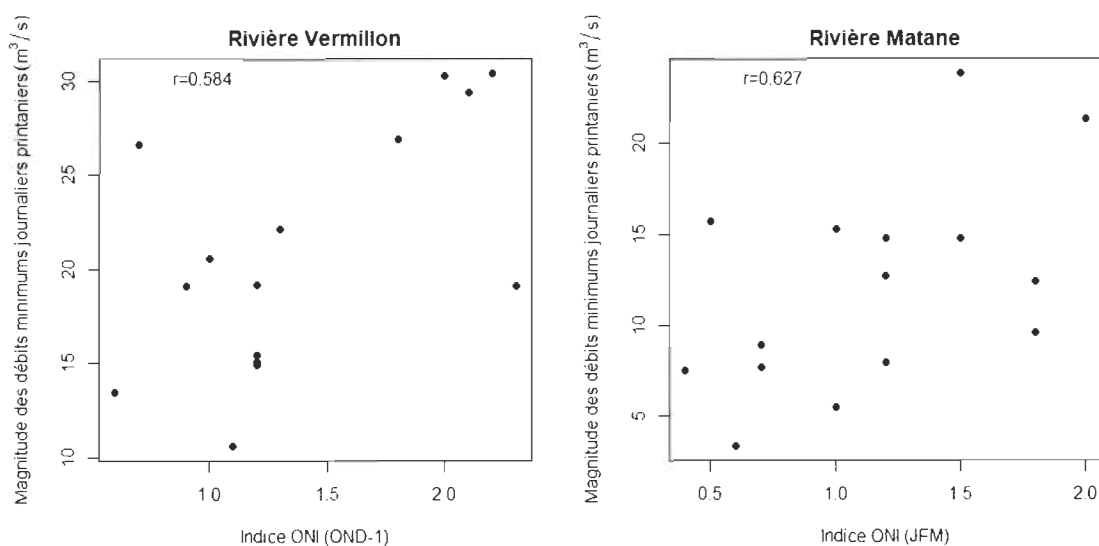


Figure 4.20 Relation entre la magnitude des débits minimums journaliers printaniers et l'indice ONI lors des épisodes El Niño d'intensité modérée à très forte pour la période 1950-2017.

4.2.5 Relation entre les périodes d'occurrence des débits minimums journaliers et les épisodes El Niño d'intensité modérée à très forte

Globalement, les périodes d'occurrence des débits minimums journaliers saisonniers et les indices d'ONI sont mieux corrélées en hiver qu'au printemps (Tableau 4.12). Cependant, il existe des disparités régionales relativement fortes. En effet, cette corrélation est bien présente dans la région hydroclimatique de l'Est alors qu'elle est quasiment absente dans la région hydroclimatique du Sud-Ouest en rive nord. En hiver, cette corrélation est négative alors qu'elle devient positive au printemps. Il s'ensuit que les épisodes intenses d'El Niño sont associés à une occurrence précoce des débits minimums journaliers en hiver, mais tardive au printemps (Figures 4.21 et 4.22).

Tableau 4.12

Coefficients de corrélation calculés entre les périodes d'occurrence des débits minimums journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les épisodes El Niño d'intensité modérée à très forte pendant la période 1950-2017

| Code | Rivière | Hiver | | | Printemps | | | |
|-------------------------------------|---------------------|----------|----------|----------|-----------|---------|--------|--------|
| | | JAS-1 | OND-1 | JFM | JAS-1 | OND-1 | JFM | AMJ |
| Région hydroclimatique du Sud-Est | | | | | | | | |
| SE1 | Châteauguay | -0,400 | -0,289 | -0,195 | -0,107 | -0,039 | -0,002 | -0,043 |
| SE2 | Eaton | -0,118 | -0,111 | 0,165 | 0,001 | 0,006 | -0,248 | -0,160 |
| SE3 | Nicolet SW | -0,664** | -0,367 | -0,039 | -0,203 | -0,149 | -0,323 | -0,120 |
| SE4 | Etchemin | -0,205 | -0,206 | -0,229 | -0,236 | -0,188 | -0,354 | -0,041 |
| SE5 | Beaurivage | -0,556** | -0,245 | 0,017 | 0,069 | 0,193 | -0,113 | 0,006 |
| SE6 | Du Sud | -0,333 | -0,370 | -0,395 | -0,147 | 0,141 | -0,128 | -0,116 |
| Région hydroclimatique de l'Est | | | | | | | | |
| E1 | Ouelle | -0,749** | -0,706** | -0,387 | -0,082 | 0,082 | 0,228 | 0,404 |
| E2 | Du Loup | -0,451* | -0,572** | -0,560** | -0,132 | 0,083 | 0,013 | 0,109 |
| E3 | Trois-Pistoles | 0,008 | -0,100 | 0,018 | 0,283 | 0,570** | 0,466* | 0,094 |
| E4 | Rimouski | 0,211 | 0,020 | -0,050 | 0,195 | 0,526** | 0,329 | -0,008 |
| E5 | Matane | -0,570** | -0,624** | -0,472* | 0,286 | 0,460* | 0,335 | 0,080 |
| E6 | Blanche | 0,019 | -0,028 | 0,231 | -0,129 | 0,117 | 0,074 | 0,182 |
| Région hydroclimatique du Sud-Ouest | | | | | | | | |
| SW1 | De La Petite Nation | 0,180 | -0,028 | -0,026 | 0,346 | 0,568** | 0,394 | 0,082 |
| SW2 | Du Nord | -0,098 | -0,265 | -0,233 | -0,147 | -0,148 | -0,261 | 0,005 |
| SW3 | L'Assomption | -0,136 | -0,346 | -0,443* | 0,224 | 0,302 | -0,007 | -0,140 |
| SW4 | Matawin | -0,054 | -0,295 | -0,173 | 0,166 | 0,373 | 0,267 | -0,208 |
| SW5 | Vermillon | -0,021 | -0,257 | -0,152 | 0,209 | 0,273 | 0,158 | -0,308 |

* = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 10 %.

** = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 5 %.

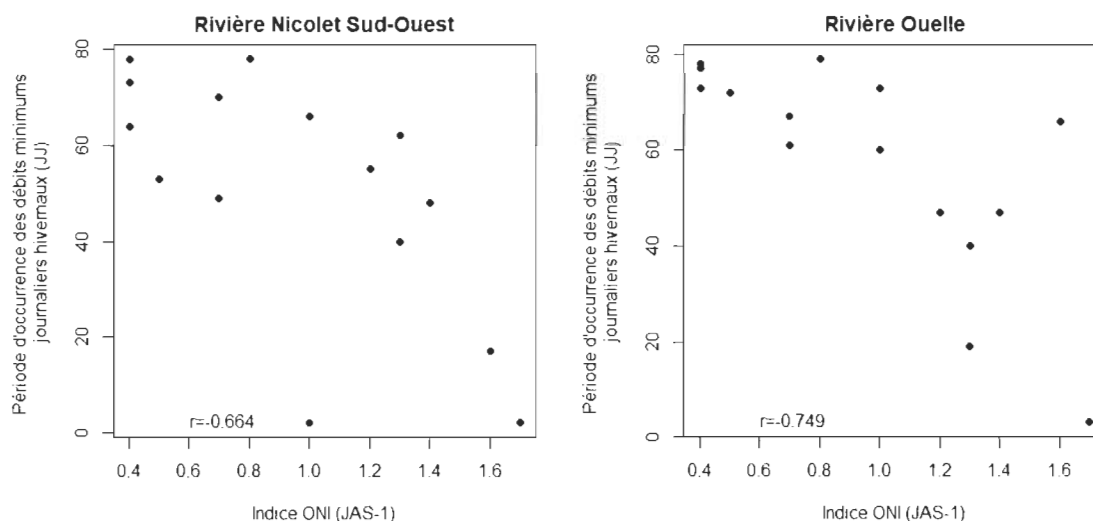


Figure 4.21 Relation entre la période d'occurrence des débits minimums journaliers hivernaux et l'indice ONI lors des épisodes El Niño d'intensité modérée à très forte pour la période 1950-2017.

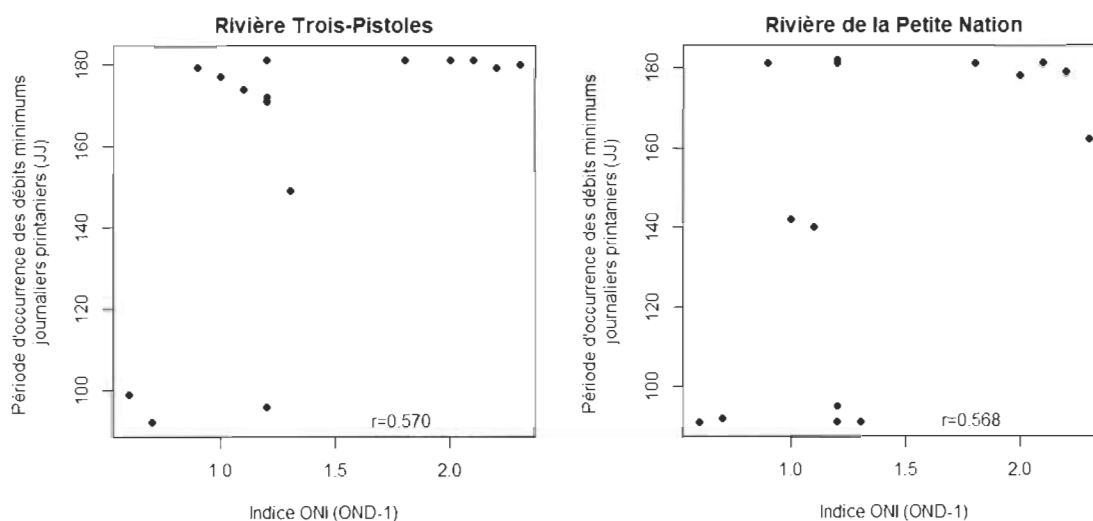


Figure 4.22 Relation entre la période d'occurrence des débits minimums journaliers printaniers et l'indice ONI lors des épisodes El Niño d'intensité modérée à très forte pour la période 1950-2017.

4.2.6 Relation entre les indices de la variabilité d'écoulement et les épisodes El Niño d'intensité modérée à très forte

En ce qui concerne les coefficients de variation dont les coefficients de corrélation sont consignés dans le tableau 4.13, on observe un lien significatif dans la région hydroclimatique de l'Est au printemps. Dans la première région hydroclimatique, les coefficients de variation sont corrélés positivement à l'indice printanier AMJ (Figure 4.23) de l'année courante, mais négativement corrélés à l'indice estival JAS-1 de l'année précédente. Dans les deux autres régions hydroclimatiques, ce lien entre les deux variables est quasi inexistant. Il en est de même en hiver dans les trois régions hydroclimatiques. Durant cette saison, la corrélation entre les deux variables a été significative pour la rivière de La Petite Nation située en rive nord.

Tableau 4.13

Coefficients de corrélation calculés entre les coefficients de variation saisonniers (hivernaux et printaniers) et les épisodes d'El Niño d'intensité modérée à très forte

| Code | Rivière | Hiver | | | Printemps | | | |
|-------------------------------------|---------------------|--------|--------|---------------|-----------------|--------|---------------|----------------|
| | | JAS-1 | OND-1 | JFM | JAS-1 | OND-1 | JFM | AMJ |
| Région hydroclimatique du Sud-Est | | | | | | | | |
| SE1 | Châteauguay | 0,054 | 0,010 | 0,104 | 0,473* | 0,281 | 0,307 | 0,185 |
| SE2 | Eaton | -0,067 | -0,010 | -0,112 | 0,167 | -0,080 | 0,030 | -0,027 |
| SE3 | Nicolet SW | -0,084 | 0,016 | -0,074 | 0,234 | 0,032 | 0,189 | 0,127 |
| SE4 | Etchemin | -0,104 | 0,080 | 0,063 | -0,133 | 0,025 | 0,379 | 0,405 |
| SE5 | Beaurivage | -0,104 | 0,068 | 0,086 | 0,101 | 0,071 | 0,365 | 0,115 |
| SE6 | Du Sud | 0,051 | 0,161 | 0,187 | -0,326 | -0,033 | 0,359 | 0,511* |
| Région hydroclimatique de l'Est | | | | | | | | |
| E1 | Ouelle | 0,081 | 0,134 | 0,039 | -0,355 | -0,043 | 0,387 | 0,452* |
| E2 | Du Loup | 0,234 | 0,300 | 0,203 | -0,373 | -0,070 | 0,345 | 0,533** |
| E3 | Trois-Pistoles | -0,131 | -0,002 | 0,005 | -0,450* | -0,124 | 0,233 | 0,508* |
| E4 | Rimouski | -0,040 | 0,066 | 0,123 | -0,514** | -0,198 | 0,247 | 0,521** |
| E5 | Matane | -0,046 | 0,058 | 0,139 | -0,490* | -0,197 | 0,147 | 0,561** |
| E6 | Blanche | 0,138 | 0,135 | 0,072 | -0,511* | -0,263 | 0,083 | 0,474* |
| Région hydroclimatique du Sud-Ouest | | | | | | | | |
| SW1 | De La Petite Nation | 0,170 | 0,349 | 0,448* | 0,248 | 0,222 | 0,427 | 0,204 |
| SW2 | Du Nord | 0,027 | 0,323 | 0,376 | 0,099 | -0,038 | 0,135 | 0,035 |
| SW3 | L'Assomption | -0,020 | 0,317 | 0,415 | -0,105 | -0,091 | 0,177 | 0,075 |
| SW4 | Matawin | 0,162 | 0,343 | 0,429 | 0,000 | 0,184 | 0,470* | 0,314 |
| SW5 | Vermillon | 0,160 | 0,374 | 0,341 | -0,131 | 0,066 | 0,494* | 0,392 |

* = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 10 %.

** = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 5 %.

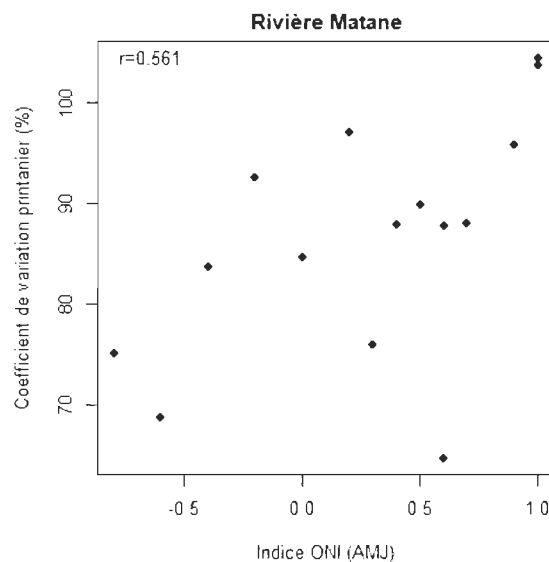


Figure 4.23 Relation entre les coefficients de variation printaniers et l'indice ONI lors des épisodes El Niño d'intensité modérée à très forte pour la période 1950-2017.

Quant aux indices d'immodération, la tendance est similaire (Figure 4.24). De fait, le lien entre cette variable hydrologique et les épisodes El Niño est observé principalement au printemps dans la région hydroclimatique de l'Est (Tableau 4.14). Ce lien est quasi inexistant dans les deux autres régions hydrologiques. On observe quelques relations négatives dans la région de l'Est avec les indices JAS-1 et OND-1.

Tableau 4.14

Coefficients de corrélation calculés entre les coefficients d'immodération saisonniers (hivernaux et printaniers) et les épisodes d'El Niño d'intensité modérée à très forte

| Code | Rivière | Hiver | | | Printemps | | | |
|-------------------------------------|---------------------|--------|--------|--------|-----------|----------|--------|--------|
| | | JAS-1 | OND-1 | JFM | JAS-1 | OND-1 | JFM | AMJ |
| Région hydroclimatique du Sud-Est | | | | | | | | |
| SE1 | Châteauguay | 0,277 | 0,307 | 0,240 | 0,601** | 0,448* | 0,332 | 0,015 |
| SE2 | Eaton | -0,147 | -0,072 | -0,155 | 0,036 | -0,136 | -0,147 | -0,182 |
| SE3 | Nicolet SW | 0,087 | 0,197 | -0,011 | 0,272 | 0,092 | 0,010 | -0,165 |
| SE4 | Etchemin | 0,131 | 0,285 | 0,074 | -0,155 | 0,082 | 0,283 | 0,351 |
| SE5 | Beaurivage | 0,062 | 0,231 | 0,158 | 0,013 | -0,099 | -0,247 | -0,295 |
| SE6 | Du Sud | -0,038 | 0,089 | 0,165 | -0,351 | -0,181 | 0,052 | 0,316 |
| Région hydroclimatique de l'Est | | | | | | | | |
| E1 | Ouelle | 0,126 | 0,267 | 0,201 | -0,529** | -0,198 | 0,224 | 0,443* |
| E2 | Du Loup | 0,449* | 0,424 | 0,291 | -0,138 | -0,152 | 0,215 | 0,321 |
| E3 | Trois-Pistoles | -0,132 | 0,014 | 0,126 | -0,385 | 0,107 | 0,189 | 0,240 |
| E4 | Rimouski | -0,057 | 0,057 | 0,198 | -0,259 | 0,102 | 0,315 | 0,408 |
| E5 | Matane | -0,115 | -0,001 | 0,122 | -0,598** | -0,585** | -0,420 | -0,017 |
| E6 | Blanche | 0,187 | 0,067 | 0,219 | -0,632** | -0,544** | -0,375 | 0,153 |
| Région hydroclimatique du Sud-Ouest | | | | | | | | |
| SW1 | De La Petite Nation | 0,261 | 0,372 | 0,434 | 0,318 | 0,230 | 0,402 | 0,169 |
| SW2 | Du Nord | 0,170 | 0,378 | 0,406 | 0,412 | 0,337 | 0,302 | 0,062 |
| SW3 | L'Assomption | 0,108 | 0,341 | 0,405 | 0,295 | 0,250 | 0,228 | -0,124 |
| SW4 | Matawin | 0,258 | 0,361 | 0,416 | 0,264 | 0,255 | 0,505* | 0,240 |
| SW5 | Vermillon | 0,123 | 0,312 | 0,303 | -0,239 | -0,091 | 0,301 | 0,318 |

* = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 10 %.

** = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 5 %.

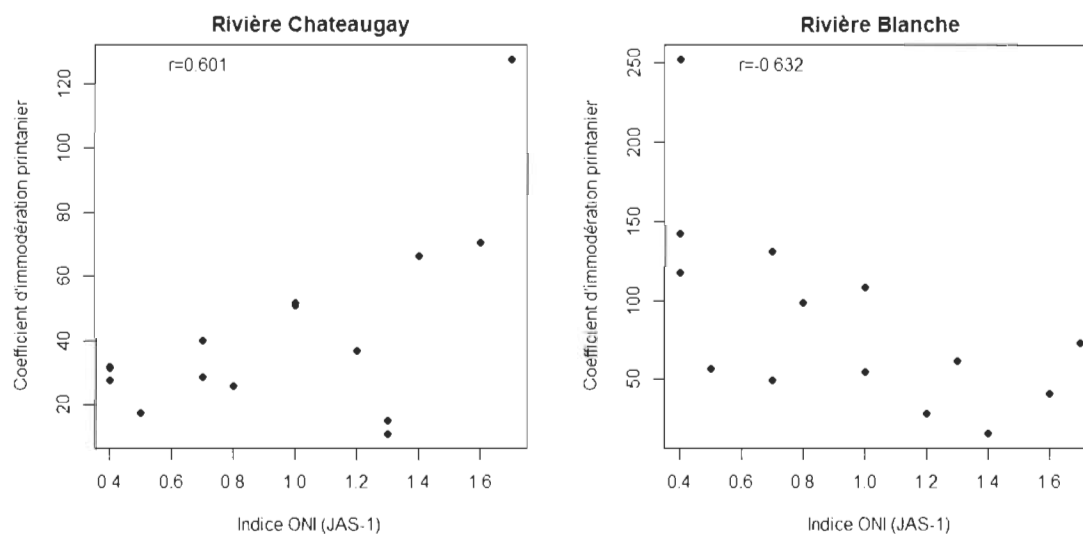


Figure 4.24 Relation entre les coefficients d'immodération printaniers et l'indice ONI lors des épisodes El Niño d'intensité modérée à très forte pour la période 1950-2017.

CHAPITRE V

COMPARAISON DE L'INFLUENCE DE L'INTENSITÉ DES ÉPISODES DE LA NIÑA SUR LES CARACTÉRISTIQUES DES DÉBITS JOURNALIERS EN HIVER ET AU PRINTEMPS

5.1 Analyse de l'influence des épisodes de La Niña d'intensité faible à forte

5.1.1 Relation entre les débits moyens journaliers saisonniers et les épisodes de La Niña d'intensité faible à forte

Les coefficients de corrélation calculés entre les débits moyens journaliers saisonniers et les différents indices des épisodes La Niña sont présentés au tableau 5.1. Contrairement à El Niño, les épisodes La Niña ne sont quasi pas corrélés aux débits moyens journaliers en hiver et au printemps dans les trois régions hydroclimatiques. À l'échelle de tout le Québec, seulement deux rivières sont corrélées significativement à ces épisodes. Il s'agit des rivières Nicolet du Sud-Ouest en rive sud et Vermillon en rive nord. Cette corrélation s'observe seulement au printemps. Elle est négative. Il s'ensuit que pour ces deux rivières, les épisodes intenses de la Niña sont associés aux débits moyens journaliers relativement élevés. Rappelons que les indices océaniques Niño associés aux épisodes La Niña sont négatifs.

Tableau 5.1

Coefficients de corrélation calculés entre les débits moyens journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices des épisodes La Niña d'intensité faible à forte pendant la période 1950-2017

| Code | Rivière | Hiver | | | Printemps | | | |
|-------------------------------------|---------------------|--------|--------|--------|-----------|---------|--------|--------|
| | | JAS-1 | OND-1 | JFM | JAS-1 | OND-1 | JFM | AMJ |
| Région hydroclimatique du Sud-Est | | | | | | | | |
| SE1 | Châteauguay | -0,166 | -0,109 | -0,276 | -0,199 | -0,098 | -0,203 | -0,012 |
| SE2 | Eaton | -0,173 | -0,067 | -0,246 | -0,249 | -0,287 | -0,327 | -0,129 |
| SE3 | Nicolet SW | -0,139 | -0,141 | -0,200 | -0,36 | -0,407* | -0,362 | -0,114 |
| SE4 | Etchemin | -0,306 | -0,236 | -0,286 | -0,265 | -0,307 | -0,271 | -0,217 |
| SE5 | Beaurivage | -0,219 | -0,180 | -0,206 | -0,202 | -0,276 | -0,299 | -0,171 |
| SE6 | Du Sud | -0,262 | -0,236 | -0,147 | -0,066 | -0,177 | -0,199 | -0,087 |
| Région hydroclimatique de l'Est | | | | | | | | |
| E1 | Ouelle | -0,083 | 0,030 | -0,001 | -0,05 | -0,108 | -0,162 | -0,086 |
| E2 | Du Loup | 0,127 | 0,128 | 0,019 | -0,105 | -0,048 | -0,208 | -0,196 |
| E3 | Trois-Pistoles | -0,024 | 0,036 | 0,076 | -0,063 | -0,066 | -0,155 | -0,158 |
| E4 | Rimouski | 0,021 | 0,148 | 0,056 | -0,064 | -0,152 | -0,105 | -0,124 |
| E5 | Matane | 0,065 | 0,116 | 0,049 | -0,1 | -0,175 | -0,228 | -0,244 |
| E6 | Blanche | -0,079 | 0,044 | -0,002 | 0,089 | 0,012 | -0,123 | -0,269 |
| Région hydroclimatique du Sud-Ouest | | | | | | | | |
| SW1 | De La Petite Nation | 0,216 | 0,112 | -0,018 | -0,094 | -0,123 | -0,104 | 0,121 |
| SW2 | Du Nord | 0,116 | 0,010 | -0,025 | -0,066 | -0,071 | -0,087 | 0,177 |
| SW3 | L'Assomption | 0,081 | 0,017 | 0,006 | -0,147 | -0,173 | -0,177 | 0,088 |
| SW4 | Matawin | -0,060 | -0,042 | -0,096 | -0,314 | -0,257 | -0,282 | 0,011 |
| SW5 | Vermillon | -0,020 | 0,154 | 0,130 | -0,384* | -0,358 | -0,314 | -0,054 |

* = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 10 %.

** = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 5 %.

5.1.2 Relation entre les débits maximums journaliers saisonniers et les épisodes de La Niña d'intensité faible à forte

Les débits maximums journaliers sont corrélés significativement aux indices automnaux (OND-1) et hivernaux (JFM) des épisodes La Niña seulement dans la région hydroclimatique du Sud-Est en hiver et ces relations sont négatives (Tableau 5.2).

La figure 5.1 montre un exemple de ce type de relation. Puisque les indices de La Niña sont négatifs, un coefficient de corrélation négatif, comme celui de la rivière Etchemin avec JAS-1, un épisode La Niña intense se traduit par une hausse de la magnitude des débits maximums à l'hiver (Figure 5.1).

Tableau 5.2

Coefficients de corrélation calculés entre les débits maximums journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices des épisodes La Niña d'intensité faible à forte pendant la période 1950-2017

| Code | Rivière | Hiver | | | Printemps | | | |
|-------------------------------------|---------------------|----------|----------|----------|-----------|--------|--------|--------|
| | | JAS-1 | OND-1 | JFM | JAS-1 | OND-1 | JFM | AMJ |
| Région hydroclimatique du Sud-Est | | | | | | | | |
| SE1 | Châteauguay | -0,308 | -0,452** | -0,444** | -0,171 | -0,087 | -0,151 | -0,029 |
| SE2 | Eaton | -0,335 | -0,261 | -0,382* | -0,215 | -0,283 | -0,147 | -0,106 |
| SE3 | Nicolet SW | -0,216 | -0,414* | -0,291 | -0,327 | -0,077 | -0,210 | -0,243 |
| SE4 | Etchemin | -0,454** | -0,400* | -0,304 | -0,182 | -0,166 | -0,237 | -0,179 |
| SE5 | Beaurivage | -0,415* | -0,426* | -0,419* | 0,137 | 0,139 | -0,020 | -0,131 |
| SE6 | Du Sud | -0,287 | -0,289 | -0,160 | -0,097 | -0,126 | -0,242 | -0,050 |
| Région hydroclimatique de l'Est | | | | | | | | |
| E1 | Ouelle | -0,172 | -0,149 | -0,051 | 0,133 | 0,006 | -0,146 | -0,017 |
| E2 | Du Loup | -0,142 | -0,142 | -0,130 | -0,075 | -0,111 | -0,223 | -0,155 |
| E3 | Trois-Pistoles | -0,109 | -0,109 | -0,053 | 0,021 | -0,125 | -0,226 | -0,126 |
| E4 | Rimouski | -0,094 | -0,069 | -0,014 | -0,065 | -0,130 | -0,092 | -0,024 |
| E5 | Matane | -0,003 | -0,011 | 0,026 | -0,158 | -0,226 | -0,193 | -0,055 |
| E6 | Blanche | -0,145 | -0,086 | -0,006 | 0,041 | -0,034 | -0,146 | -0,066 |
| Région hydroclimatique du Sud-Ouest | | | | | | | | |
| SW1 | De La Petite Nation | 0,068 | -0,007 | -0,037 | 0,147 | 0,187 | 0,112 | 0,097 |
| SW2 | Du Nord | -0,075 | -0,155 | -0,149 | 0,165 | 0,151 | 0,063 | 0,146 |
| SW3 | L'Assomption | -0,117 | -0,149 | -0,137 | 0,022 | -0,003 | -0,103 | 0,034 |
| SW4 | Matawin | -0,159 | -0,144 | -0,089 | -0,068 | -0,005 | -0,116 | -0,026 |
| SW5 | Vermillon | -0,116 | -0,068 | -0,011 | -0,275 | -0,189 | -0,220 | -0,044 |

* = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 10 %.

** = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 5 %.

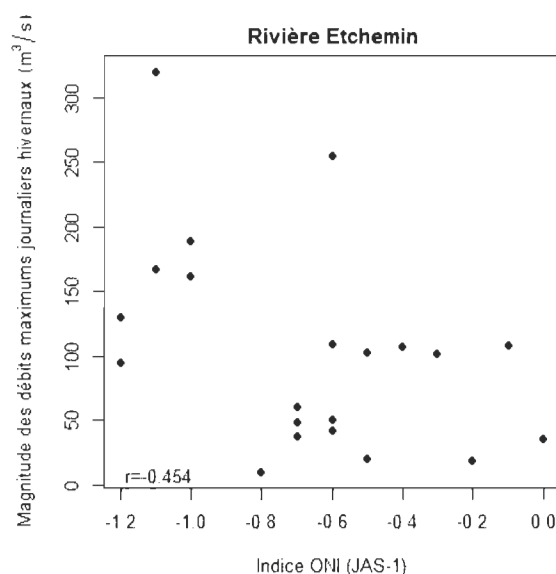


Figure 5.1 Relation entre la magnitude des débits maximums journaliers hivernaux et l'indice ONI lors des épisodes La Niña d'intensité faible à forte pour la période 1950-2017.

5.1.3 Relation entre les périodes d'occurrence des débits maximums journaliers saisonniers et les épisodes de La Niña d'intensité faible à forte

Les indices des épisodes de La Niña sont corrélés aux périodes d'occurrence des débits maximums journaliers de trois rivières seulement : deux rivières dans la région hydroclimatique du Sud-Est en hiver et une seule dans la région hydroclimatique du Sud-Ouest au printemps. Cette corrélation est négative pour les trois rivières (Tableau 5.3). Ainsi, les épisodes intenses de la Niña sont associés à une occurrence tardive des débits maximums journaliers en hiver et au printemps (Figure 5.2).

Tableau 5.3

Coefficients de corrélation calculés entre les périodes d'occurrence des débits maximums journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices des épisodes La Niña d'intensité faible à forte pendant la période 1950-2017

| Code | Rivière | Hiver | | | Printemps | | | |
|-------------------------------------|---------------------|----------|--------|--------|-----------|---------|--------|--------|
| | | JAS-1 | OND-1 | JFM | JAS-1 | OND-1 | JFM | AMJ |
| Région hydroclimatique du Sud-Est | | | | | | | | |
| SE1 | Châteauguay | -0,379* | -0,033 | -0,161 | 0,098 | 0,124 | 0,011 | 0,109 |
| SE2 | Eaton | 0,011 | 0,198 | 0,077 | 0,286 | 0,102 | 0,036 | -0,101 |
| SE3 | Nicolet SW | -0,117 | 0,169 | -0,038 | -0,36 | -0,224 | -0,34 | -0,33 |
| SE4 | Etchemin | -0,192 | 0,086 | -0,178 | -0,08 | -0,139 | -0,097 | -0,019 |
| SE5 | Beaurivage | -0,083 | 0,194 | -0,037 | 0,08 | 0,017 | 0,241 | -0,017 |
| SE6 | Du Sud | -0,557** | -0,146 | -0,216 | 0,202 | 0,008 | 0,292 | 0,1 |
| Région hydroclimatique de l'Est | | | | | | | | |
| E1 | Ouelle | -0,357 | -0,237 | -0,289 | 0,144 | 0,127 | 0,311 | 0,138 |
| E2 | Du Loup | -0,066 | -0,013 | -0,192 | 0,01 | -0,098 | 0,216 | 0,146 |
| E3 | Trois-Pistoles | -0,077 | 0,088 | 0,154 | 0,057 | 0,046 | 0,282 | 0,166 |
| E4 | Rimouski | -0,345 | -0,309 | -0,304 | -0,116 | -0,045 | 0,095 | -0,007 |
| E5 | Matane | -0,197 | -0,323 | -0,178 | 0,047 | 0,011 | 0,187 | 0,066 |
| E6 | Blanche | -0,335 | -0,109 | -0,151 | -0,025 | 0,084 | 0,237 | 0,115 |
| Région hydroclimatique du Sud-Ouest | | | | | | | | |
| SW1 | De La Petite Nation | 0,101 | -0,120 | 0,046 | -0,167 | -0,104 | -0,07 | -0,038 |
| SW2 | Du Nord | -0,113 | -0,055 | -0,088 | -0,127 | -0,05 | -0,122 | -0,119 |
| SW3 | L'Assomption | 0,154 | -0,082 | -0,134 | -0,255 | -0,425* | -0,311 | -0,266 |
| SW4 | Matawin | -0,269 | -0,187 | -0,242 | -0,313 | -0,261 | -0,018 | 0,13 |
| SW5 | Vermillon | -0,247 | -0,207 | -0,338 | -0,323 | -0,162 | -0,004 | 0,279 |

* = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 10 %.

** = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 5 %.

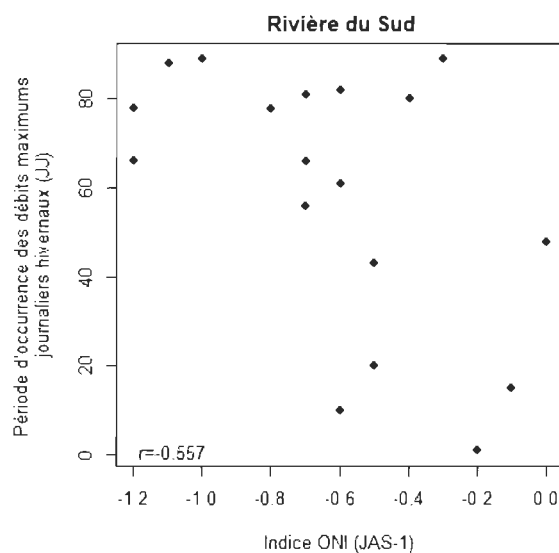


Figure 5.2 Relation entre la période d'occurrence des débits maximums journaliers hivernaux et l'indice ONI lors des épisodes La Niña d'intensité faible à forte pour la période 1950-2017.

5.1.4 Relation entre les débits minimums journaliers saisonniers et les épisodes de La Niña d'intensité faible à forte

La corrélation entre les deux variables a été observée dans cinq bassins versants seulement : deux dans chacune de deux régions hydroclimatiques de la rive sud et un seul dans la région hydroclimatique de la rive nord (Tableau 5.4). Le signe de cette corrélation varie d'un bassin versant à un autre d'une part, selon les saisons, d'autre part.

Tableau 5.4

Coefficients de corrélation calculés entre les débits minimums journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices des épisodes La Niña d'intensité faible à forte pendant la période 1950-2017

| Code | Rivière | Hiver | | | Printemps | | | |
|-------------------------------------|---------------------|--------|--------|--------|-----------|---------|---------|--------|
| | | JAS-1 | OND-1 | JFM | JAS-1 | OND-1 | JFM | AMJ |
| Région hydroclimatique du Sud-Est | | | | | | | | |
| SE1 | Châteauguay | 0,122 | 0,130 | -0,058 | -0,079 | -0,185 | -0,135 | 0,236 |
| SE2 | Eaton | 0,221 | 0,276 | 0,097 | 0,117 | -0,133 | -0,158 | 0,073 |
| SE3 | Nicolet SW | 0,217 | 0,061 | -0,093 | -0,144 | -0,424* | -0,419* | -0,136 |
| SE4 | Etchemin | 0,267 | 0,126 | 0,017 | 0,289 | -0,007 | 0,042 | 0,076 |
| SE5 | Beaurivage | 0,154 | -0,054 | -0,048 | 0,110 | -0,203 | -0,214 | 0,056 |
| SE6 | Du Sud | 0,004 | -0,024 | -0,101 | 0,391* | 0,063 | 0,056 | 0,115 |
| Région hydroclimatique de l'Est | | | | | | | | |
| E1 | Ouelle | 0,175 | 0,193 | -0,039 | 0,280 | -0,028 | 0,217 | 0,238 |
| E2 | Du Loup | 0,354 | 0,232 | 0,039 | 0,318 | 0,252 | 0,125 | 0,171 |
| E3 | Trois-Pistoles | 0,401* | 0,227 | 0,126 | 0,35 | 0,177 | 0,158 | 0,107 |
| E4 | Rimouski | 0,103 | 0,279 | -0,019 | -0,023 | 0,007 | -0,175 | -0,169 |
| E5 | Matane | 0,020 | 0,265 | -0,005 | -0,012 | -0,223 | 0,049 | -0,152 |
| E6 | Blanche | 0,046 | 0,105 | -0,139 | 0,307 | 0,403* | 0,184 | -0,063 |
| Région hydroclimatique du Sud-Ouest | | | | | | | | |
| SW1 | De La Petite Nation | 0,132 | 0,081 | -0,212 | -0,22 | -0,205 | -0,178 | 0,053 |
| SW2 | Du Nord | 0,138 | -0,014 | -0,220 | -0,195 | -0,254 | -0,257 | 0,147 |
| SW3 | L'Assomption | 0,060 | 0,006 | -0,193 | -0,181 | -0,228 | -0,319 | -0,128 |
| SW4 | Matawin | -0,109 | -0,087 | -0,294 | -0,31 | -0,374* | -0,428* | -0,016 |
| SW5 | Vermillon | -0,038 | 0,140 | -0,069 | -0,181 | -0,101 | -0,331 | -0,149 |

* = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 10 %.

** = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 5 %.

5.1.5 Relation entre les périodes d'occurrence des débits minimums journaliers saisonniers et les épisodes de La Niña d'intensité faible à forte

La corrélation entre les deux variables a été observée seulement dans deux bassins versants situés tous dans la région hydroclimatique du Sud-Est (Tableau 5.5). Cette corrélation y est négative (Figures 5.3 et 5.4).

Tableau 5.5

Coefficients de corrélation calculés entre les périodes d'occurrence des débits minimums journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices des épisodes La Niña d'intensité faible à forte pendant la période 1950-2017

| Code | Rivière | Hiver | | | Printemps | | | |
|-------------------------------------|---------------------|----------------|-----------------|----------------|-----------|--------|--------|-----------------|
| | | JAS-1 | OND-1 | JFM | JAS-1 | OND-1 | JFM | AMJ |
| Région hydroclimatique du Sud-Est | | | | | | | | |
| SE1 | Châteauguay | 0,165 | 0,177 | 0,227 | -0,139 | 0,002 | 0,029 | -0,011 |
| SE2 | Eaton | -0,161 | 0,024 | -0,012 | -0,239 | 0,039 | 0,133 | 0,017 |
| SE3 | Nicolet SW | 0,047 | 0,232 | 0,029 | -0,053 | -0,119 | -0,214 | -0,533** |
| SE4 | Etchemin | -0,115 | 0,192 | 0,244 | -0,025 | 0,166 | -0,24 | -0,308 |
| SE5 | Beaurivage | -0,375* | -0,518** | -0,432* | -0,122 | 0,223 | -0,083 | -0,014 |
| SE6 | Du Sud | -0,003 | 0,209 | 0,122 | -0,334 | -0,008 | -0,168 | -0,132 |
| Région hydroclimatique de l'Est | | | | | | | | |
| E1 | Ouelle | -0,209 | -0,342 | -0,217 | -0,295 | -0,202 | -0,169 | -0,151 |
| E2 | Du Loup | -0,154 | -0,075 | -0,021 | -0,255 | -0,172 | -0,203 | 0,029 |
| E3 | Trois-Pistoles | 0,042 | -0,164 | -0,060 | 0,011 | 0,208 | 0,242 | 0,325 |
| E4 | Rimouski | -0,115 | -0,134 | -0,129 | -0,153 | -0,107 | -0,091 | -0,013 |
| E5 | Matane | 0,057 | 0,172 | 0,081 | -0,092 | -0,069 | -0,075 | -0,165 |
| E6 | Blanche | 0,109 | 0,348 | -0,065 | -0,066 | 0,056 | -0,19 | -0,215 |
| Région hydroclimatique du Sud-Ouest | | | | | | | | |
| SW1 | De La Petite Nation | 0,036 | 0,059 | -0,159 | 0,173 | 0,124 | 0,148 | 0,17 |
| SW2 | Du Nord | -0,061 | -0,177 | 0,025 | -0,035 | 0,188 | -0,189 | -0,264 |
| SW3 | L'Assomption | -0,087 | -0,088 | -0,153 | 0,221 | 0,291 | 0,174 | -0,057 |
| SW4 | Matawin | 0,182 | -0,002 | 0,104 | -0,137 | -0,11 | -0,297 | -0,032 |
| SW5 | Vermillon | -0,067 | -0,019 | 0,153 | 0,105 | 0,137 | -0,032 | 0,215 |

* = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 10 %.

** = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 5 %.

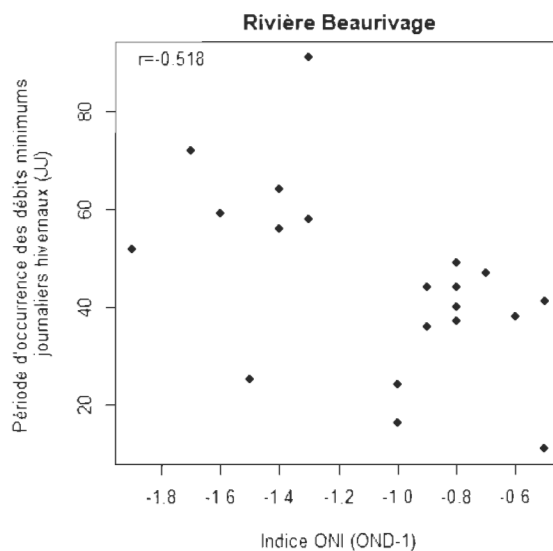


Figure 5.3 Relation entre la période d'occurrence des débits minimums journaliers hivernaux et l'indice ONI lors des épisodes La Niña d'intensité faible à forte pour la période 1950-2017.

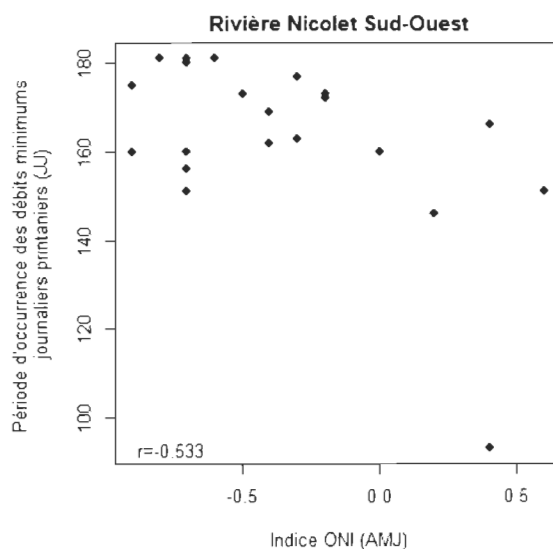


Figure 5.4 Relation entre la période d'occurrence des débits minimums journaliers printaniers et l'indice ONI lors des épisodes La Niña d'intensité faible à forte pour la période 1950-2017.

5.1.6 Relation entre les indices de variabilité de l'écoulement et les épisodes de La Niña d'intensité faible à forte

En ce qui concerne les coefficients de variation (CV), cette variable hydrologique est significativement corrélée aux indices automnaux (OND-1) des épisodes La Niña principalement dans les régions hydroclimatiques du Sud-Est et du Sud-Ouest respectivement en hiver et au printemps (Tableau 5.6). En hiver, cette corrélation est négative alors qu'au printemps, elle est positive. Ainsi, les épisodes intenses de la Niña sont associés à une forte variabilité interjournalière des débits en hiver, mais faible variabilité interjournalière au printemps (Figures 5.5 et 5.6). Quant aux coefficients d'immodération (CI), ils sont significativement corrélés aux indices des épisodes de la Niña dans la région hydroclimatique de l'Est seulement en hiver (Tableau 5.7). Ce sont les indices estivaux (JAS-1) et automnaux (OND-1) qui sont mieux corrélés aux coefficients d'immodération. Cette corrélation est négative. Il s'ensuit que les épisodes intenses de La Niña provoquent une forte amplitude des débits en hiver dans la région hydroclimatique du Sud-Est (Figure 5.7).

Tableau 5.6

Coefficients de corrélation calculés entre les coefficients de variation saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices des épisodes La Niña d'intensité faible à forte pendant la période 1950-2017

| Code | Rivière | Hiver | | | Printemps | | | |
|-------------------------------------|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------|----------------|--------|--------|
| | | JAS-1 | OND-1 | JFM | JAS-1 | OND-1 | JFM | AMJ |
| Région hydroclimatique du Sud-Est | | | | | | | | |
| SE1 | Châteauguay | -0,307 | -0,455** | -0,457** | -0,097 | 0,099 | -0,009 | -0,171 |
| SE2 | Eaton | -0,260 | -0,322 | -0,338 | -0,134 | 0,037 | 0,125 | -0,044 |
| SE3 | Nicolet SW | -0,235 | -0,468** | -0,271 | -0,041 | 0,338 | 0,115 | -0,13 |
| SE4 | Etchemin | -0,442** | -0,382* | -0,135 | -0,007 | 0,278 | -0,048 | -0,054 |
| SE5 | Beaurivage | -0,400* | -0,314 | -0,376* | 0,357 | 0,491** | 0,168 | -0,059 |
| SE6 | Du Sud | -0,359 | -0,387* | -0,200 | 0,051 | 0,308 | 0,039 | 0,142 |
| Région hydroclimatique de l'Est | | | | | | | | |
| E1 | Ouelle | -0,380* | -0,273 | -0,150 | 0,188 | 0,307 | -0,003 | 0,051 |
| E2 | Du Loup | -0,359 | -0,290 | -0,129 | 0,199 | 0,313 | 0,09 | -0,024 |
| E3 | Trois-Pistoles | -0,297 | -0,260 | -0,187 | 0,277 | 0,252 | 0,071 | 0,035 |
| E4 | Rimouski | -0,184 | -0,142 | -0,035 | 0,128 | 0,083 | 0,118 | 0,096 |
| E5 | Matane | -0,078 | -0,129 | -0,059 | -0,077 | 0,006 | 0,028 | 0,132 |
| E6 | Blanche | -0,307 | -0,225 | -0,105 | 0,128 | 0,17 | 0,053 | -0,004 |
| Région hydroclimatique du Sud-Ouest | | | | | | | | |
| SW1 | De La Petite Nation | 0,101 | 0,061 | 0,231 | 0,264 | 0,401* | 0,235 | -0,11 |
| SW2 | Du Nord | -0,179 | -0,257 | -0,170 | 0,343 | 0,379* | 0,152 | -0,122 |
| SW3 | L'Assomption | -0,211 | -0,260 | -0,146 | 0,361 | 0,389* | 0,116 | -0,117 |
| SW4 | Matawin | -0,136 | -0,092 | 0,024 | 0,324 | 0,480** | 0,343 | 0,148 |
| SW5 | Vermillon | -0,120 | -0,062 | 0,026 | 0,137 | 0,306 | 0,129 | 0,085 |

* = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 10 %.

** = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 5 %.

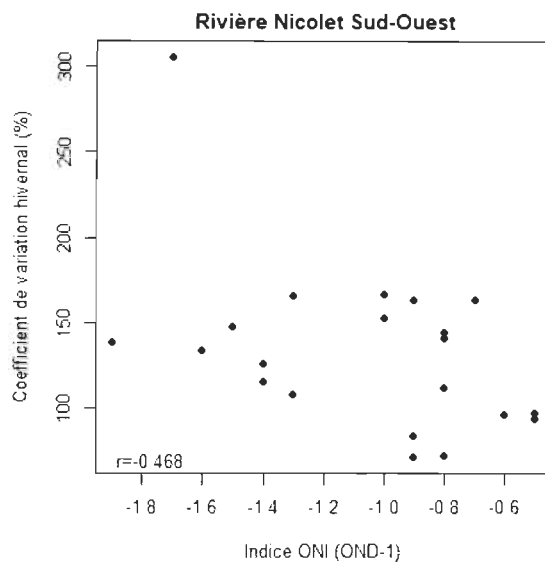


Figure 5.5 Relation entre les coefficients de variation hivernaux et l'indice ONI lors des épisodes La Niña d'intensité faible à forte pour la période 1950-2017.

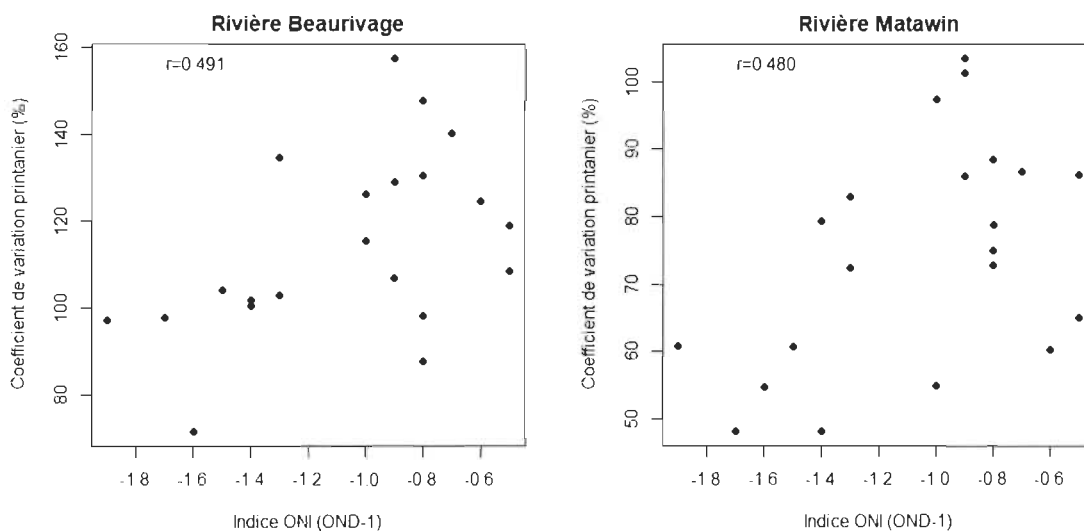


Figure 5.6 Relation entre les coefficients de variation printaniers et l'indice ONI lors des épisodes La Niña d'intensité faible à forte pour la période 1950-2017.

Tableau 5.7

Coefficients de corrélation calculés entre les coefficients d'immodération saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices des épisodes La Niña d'intensité faible à forte pendant la période 1950-2017

| Code | Rivière | Hiver | | | Printemps | | | |
|-------------------------------------|---------------------|----------|----------|----------|-----------|--------|--------|--------|
| | | JAS-1 | OND-1 | JFM | JAS-1 | OND-1 | JFM | AMJ |
| Région hydroclimatique du Sud-Est | | | | | | | | |
| SE1 | Châteauguay | -0,402* | -0,514** | -0,488** | 0,063 | 0,263 | 0,11 | -0,266 |
| SE2 | Eaton | -0,410* | -0,387* | -0,420* | -0,152 | 0,015 | 0,043 | -0,235 |
| SE3 | Nicolet SW | -0,332 | -0,424* | -0,260 | -0,037 | 0,331 | 0,142 | -0,227 |
| SE4 | Etchemin | -0,484** | -0,387* | -0,240 | -0,241 | 0,045 | 0,001 | -0,057 |
| SE5 | Beaurivage | -0,520** | -0,409* | -0,447** | 0,057 | 0,378* | 0,202 | -0,227 |
| SE6 | Du Sud | -0,381* | -0,408* | -0,297 | -0,31 | -0,02 | -0,195 | -0,247 |
| Région hydroclimatique de l'Est | | | | | | | | |
| E1 | Ouelle | -0,318 | -0,268 | -0,187 | -0,154 | 0,129 | -0,077 | 0,12 |
| E2 | Du Loup | -0,329 | -0,265 | -0,082 | -0,368 | -0,298 | -0,193 | -0,101 |
| E3 | Trois-Pistoles | -0,181 | -0,157 | -0,069 | -0,31 | -0,319 | -0,356 | -0,216 |
| E4 | Rimouski | -0,065 | -0,078 | 0,030 | -0,025 | -0,108 | 0,111 | 0,142 |
| E5 | Matane | -0,005 | -0,038 | 0,043 | -0,091 | -0,077 | -0,196 | 0,043 |
| E6 | Blanche | -0,212 | -0,121 | 0,031 | -0,142 | -0,314 | -0,266 | -0,051 |
| Région hydroclimatique du Sud-Ouest | | | | | | | | |
| SW1 | De La Petite Nation | -0,030 | -0,078 | 0,114 | 0,264 | 0,273 | 0,205 | -0,077 |
| SW2 | Du Nord | -0,133 | -0,194 | -0,128 | 0,238 | 0,291 | 0,171 | -0,087 |
| SW3 | L'Assomption | -0,134 | -0,159 | -0,091 | 0,135 | 0,191 | 0,125 | 0,183 |
| SW4 | Matawin | -0,160 | -0,129 | -0,022 | 0,134 | 0,277 | 0,25 | -0,031 |
| SW5 | Vermillon | -0,126 | -0,086 | -0,006 | -0,039 | -0,028 | 0,161 | 0,289 |

* = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 10 %.

** = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 5 %.

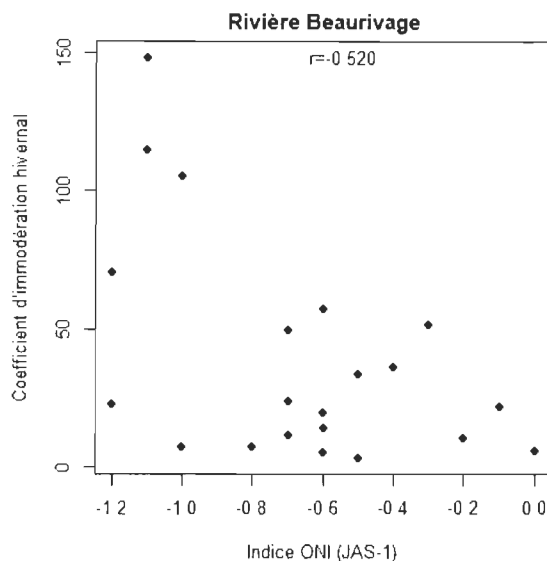


Figure 5.7 Relation entre les coefficients d'immodération hivernaux et l'indice ONI lors des épisodes La Niña d'intensité faible à forte pour la période 1950-2017.

5.2 Analyse de l'influence des épisodes de La Niña d'intensité modérée à forte

5.2.1 Relation entre les débits moyens journaliers saisonniers et les épisodes de La Niña d'intensité modérée à forte

En éliminant les épisodes de faible intensité de La Niña, on observe une nette amélioration du lien entre La Niña et les débits moyens journaliers. En effet, le nombre des rivières corrélées à La Niña a significativement augmenté comparativement au tableau 5.1. Ainsi, cet événement devient significativement corrélé dans presque toutes les rivières des régions hydroclimatiques de l'Est et du Sud-Ouest principalement au printemps (Tableau 5.8). Ce sont les indices hivernaux (JFM) qui sont les mieux corrélés aux débits moyens journaliers dans les deux régions. Cette corrélation est négative dans les deux régions. Les épisodes intenses de La Niña y sont donc associés aux débits moyens journaliers relativement élevés (Figure 5.8). Dans la région hydroclimatique du Sud-Est, il n'existe aucun coefficient de corrélation statistiquement significative. Néanmoins, leurs valeurs ont significativement augmenté au printemps confirmant ainsi la tendance générale observée à l'échelle du Québec.

Tableau 5.8

Coefficients de corrélation calculés entre les débits moyens journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices des épisodes La Niña d'intensité modérée à forte pendant la période 1950-2017

| Code | Rivière | Hiver | | | Printemps | | | |
|-------------------------------------|---------------------|--------|--------|--------|-----------|----------|----------|--------|
| | | JAS-1 | OND-1 | JFM | JAS-1 | OND-1 | JFM | AMJ |
| Région hydroclimatique du Sud-Est | | | | | | | | |
| SE1 | Châteauguay | -0,405 | -0,066 | -0,179 | 0,068 | 0,172 | -0,264 | -0,192 |
| SE2 | Eaton | -0,251 | 0,078 | 0,015 | -0,092 | -0,237 | -0,278 | -0,119 |
| SE3 | Nicolet SW | -0,121 | 0,053 | 0,107 | -0,278 | -0,421 | -0,426 | -0,169 |
| SE4 | Etchemin | -0,291 | 0,024 | 0,005 | -0,278 | -0,437 | -0,407 | -0,192 |
| SE5 | Beaurivage | -0,220 | 0,000 | 0,139 | -0,196 | -0,309 | -0,473 | -0,258 |
| SE6 | Du Sud | -0,008 | 0,101 | 0,290 | -0,245 | -0,259 | -0,441 | -0,105 |
| Région hydroclimatique de l'Est | | | | | | | | |
| E1 | Ouelle | 0,148 | 0,275 | 0,350 | -0,337 | -0,404 | -0,445 | 0,093 |
| E2 | Du Loup | 0,313 | 0,408 | 0,307 | -0,440 | -0,285 | -0,559* | -0,139 |
| E3 | Trois-Pistoles | 0,267 | 0,313 | 0,378 | -0,391 | -0,392 | -0,560* | -0,266 |
| E4 | Rimouski | 0,418 | 0,465 | 0,424 | -0,566* | -0,695** | -0,549* | -0,344 |
| E5 | Matane | 0,526* | 0,470 | 0,582* | -0,725** | -0,628** | -0,615** | -0,481 |
| E6 | Blanche | 0,345 | 0,433 | 0,442 | -0,142 | -0,375 | -0,413 | -0,457 |
| Région hydroclimatique du Sud-Ouest | | | | | | | | |
| SW1 | De La Petite Nation | 0,261 | 0,297 | 0,002 | -0,380 | -0,446 | -0,514 | -0,117 |
| SW2 | Du Nord | 0,274 | 0,404 | 0,367 | -0,392 | -0,406 | -0,600* | -0,289 |
| SW3 | L'Assomption | 0,407 | 0,419 | 0,433 | -0,449 | -0,436 | -0,585* | -0,237 |
| SW4 | Matawin | 0,236 | 0,352 | 0,271 | -0,540* | -0,549* | -0,642** | -0,298 |
| SW5 | Vermillon | 0,096 | 0,271 | 0,340 | -0,578* | -0,573* | -0,650** | -0,351 |

* = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 10 %.

** = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 5 %.

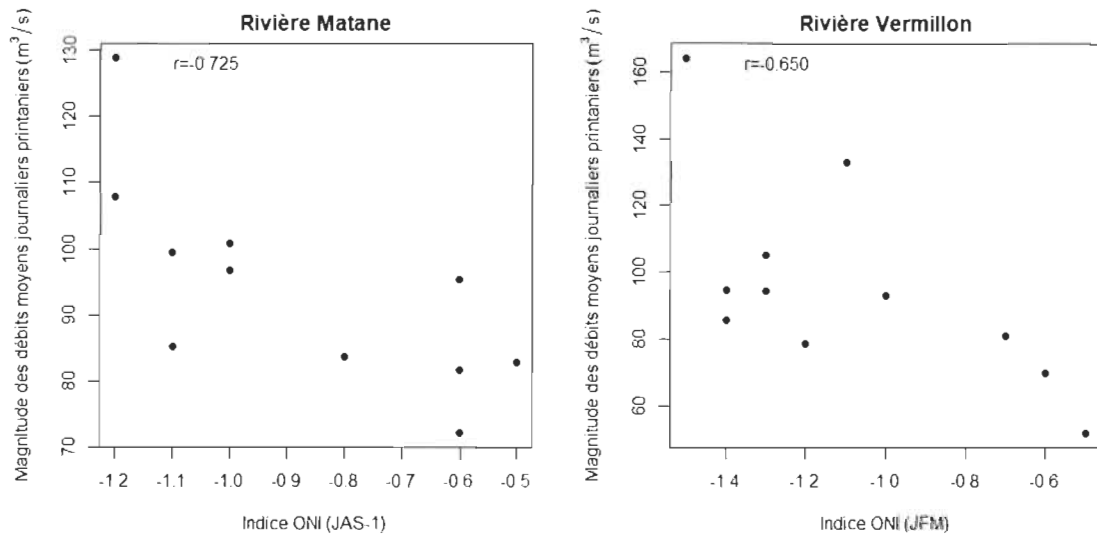


Figure 5.8 Relation entre la magnitude des débits moyens journaliers printaniers et l'indice ONI lors des épisodes La Niña d'intensité modérée à forte pour la période 1950-2017.

5.2.2 Relation entre les débits maximums journaliers saisonniers et les épisodes de La Niña d'intensité modérée à forte

Très peu de liens significatifs sont observés entre les débits maximums journaliers et les indices des épisodes La Niña (Tableau 5.9). On note qu'un seul coefficient de corrélation significatif à l'hiver, celui-ci est positif et concerne la rivière Matane de la région de l'Est. Au printemps, on observe deux liens significatifs et ceux-ci sont négatifs.

Tableau 5.9

Coefficients de corrélation calculés entre les débits maximums journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices des épisodes La Niña d'intensité modérée à forte pendant la période 1950-2017

| Code | Rivière | Hiver | | | Printemps | | | |
|-------------------------------------|---------------------|--------|--------|--------|-----------|--------|---------|--------|
| | | JAS-1 | OND-1 | JFM | JAS-1 | OND-1 | JFM | AMJ |
| Région hydroclimatique du Sud-Est | | | | | | | | |
| SE1 | Châteauguay | -0,268 | -0,205 | -0,305 | -0,099 | -0,100 | -0,330 | -0,270 |
| SE2 | Eaton | -0,241 | -0,075 | -0,160 | -0,243 | -0,377 | -0,049 | 0,140 |
| SE3 | Nicolet SW | 0,075 | -0,088 | 0,084 | -0,538* | -0,221 | -0,338 | 0,043 |
| SE4 | Etchemin | -0,325 | -0,134 | 0,088 | -0,334 | -0,350 | -0,330 | 0,009 |
| SE5 | Beaurivage | -0,320 | -0,234 | -0,087 | -0,364 | 0,142 | -0,295 | -0,044 |
| SE6 | Du Sud | 0,016 | 0,102 | 0,332 | -0,208 | -0,140 | -0,309 | 0,025 |
| Région hydroclimatique de l'Est | | | | | | | | |
| E1 | Ouelle | 0,181 | 0,256 | 0,374 | 0,064 | 0,044 | -0,217 | 0,069 |
| E2 | Du Loup | 0,278 | 0,359 | 0,360 | -0,125 | -0,108 | -0,209 | 0,002 |
| E3 | Trois-Pistoles | 0,323 | 0,385 | 0,439 | 0,032 | -0,136 | -0,243 | -0,051 |
| E4 | Rimouski | 0,341 | 0,407 | 0,500 | -0,123 | -0,233 | -0,205 | -0,170 |
| E5 | Matane | 0,410 | 0,446 | 0,562* | -0,164 | -0,164 | -0,386 | -0,227 |
| E6 | Blanche | 0,241 | 0,333 | 0,453 | 0,032 | -0,096 | -0,257 | -0,168 |
| Région hydroclimatique du Sud-Ouest | | | | | | | | |
| SW1 | De La Petite Nation | 0,204 | 0,334 | 0,190 | 0,128 | 0,034 | -0,211 | -0,005 |
| SW2 | Du Nord | 0,193 | 0,225 | 0,257 | -0,037 | -0,054 | -0,258 | 0,062 |
| SW3 | L'Assomption | 0,241 | 0,278 | 0,279 | -0,198 | -0,131 | -0,337 | 0,120 |
| SW4 | Matawin | 0,251 | 0,331 | 0,363 | -0,231 | -0,281 | -0,506 | -0,202 |
| SW5 | Vermillon | 0,238 | 0,320 | 0,388 | -0,438 | -0,413 | -0,578* | -0,214 |

* = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 10 %.

** = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 5 %.

5.2.3 Relation entre les périodes d'occurrence des débits maximums journaliers saisonniers et les épisodes de La Niña d'intensité modérée à forte

Les périodes d'occurrence des débits maximums journaliers de huit rivières sont négativement corrélées à l'indice estival (JAS-1) des épisodes La Niña en hiver, dont toutes celles de la région du Sud-Est. Pour ces rivières, les débits maximums

hivernaux surviennent plus tard dans la saison (Figure 5.9). Au printemps, on observe cinq rivières montrant au moins une relation significative. Pour deux de ces rivières, les liens sont positifs alors que pour les trois autres, les corrélations sont négatives et associées à l'indice océanique Niño printanier (Tableau 5.10 et Figure 5.10).

Tableau 5.10

Coefficients de corrélation calculés entre les périodes d'occurrence des débits maximums journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices des épisodes La Niña d'intensité modérée à forte pendant la période 1950-2017

| Code | Rivière | Hiver | | | Printemps | | | |
|-------------------------------------|---------------------|----------|--------|--------|-----------|--------|---------|---------|
| | | JAS-1 | OND-1 | JFM | JAS-1 | OND-1 | JFM | AMJ |
| Région hydroclimatique du Sud-Est | | | | | | | | |
| SE1 | Châteauguay | -0,751** | -0,107 | -0,371 | 0,105 | 0,423 | 0,277 | 0,442 |
| SE2 | Eaton | -0,587* | -0,107 | -0,281 | 0,532* | 0,498 | 0,351 | -0,018 |
| SE3 | Nicolet SW | -0,625** | -0,117 | -0,317 | -0,081 | 0,141 | -0,239 | -0,601* |
| SE4 | Etchemin | -0,608** | 0,081 | -0,271 | 0,288 | 0,158 | 0,018 | -0,102 |
| SE5 | Beaurivage | -0,619** | -0,105 | -0,308 | 0,594* | 0,381 | 0,653** | 0,284 |
| SE6 | Du Sud | -0,708** | -0,057 | -0,369 | 0,448 | 0,054 | 0,396 | -0,102 |
| Région hydroclimatique de l'Est | | | | | | | | |
| E1 | Ouelle | -0,690** | -0,170 | -0,245 | 0,211 | 0,056 | 0,138 | -0,272 |
| E2 | Du Loup | -0,233 | 0,110 | -0,271 | 0,132 | -0,227 | 0,067 | -0,279 |
| E3 | Trois-Pistoles | -0,099 | 0,062 | 0,055 | 0,198 | -0,048 | 0,115 | -0,324 |
| E4 | Rimouski | 0,090 | 0,285 | 0,118 | 0,059 | -0,110 | -0,163 | -0,580* |
| E5 | Matane | -0,086 | 0,056 | 0,070 | -0,155 | -0,332 | -0,061 | -0,243 |
| E6 | Blanche | -0,280 | 0,354 | -0,005 | -0,030 | -0,136 | -0,135 | -0,451 |
| Région hydroclimatique du Sud-Ouest | | | | | | | | |
| SW1 | De La Petite Nation | -0,026 | -0,151 | 0,165 | -0,098 | -0,117 | -0,285 | -0,229 |
| SW2 | Du Nord | -0,641** | -0,090 | -0,214 | 0,101 | 0,379 | -0,053 | 0,035 |
| SW3 | L'Assomption | -0,315 | -0,232 | -0,151 | 0,082 | -0,158 | -0,038 | -0,065 |
| SW4 | Matawin | -0,258 | 0,121 | -0,245 | -0,074 | -0,204 | -0,146 | -0,450 |
| SW5 | Vermillon | -0,311 | 0,267 | -0,179 | -0,338 | -0,289 | -0,440 | -0,554* |

* = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 10 %.

** = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 5 %.

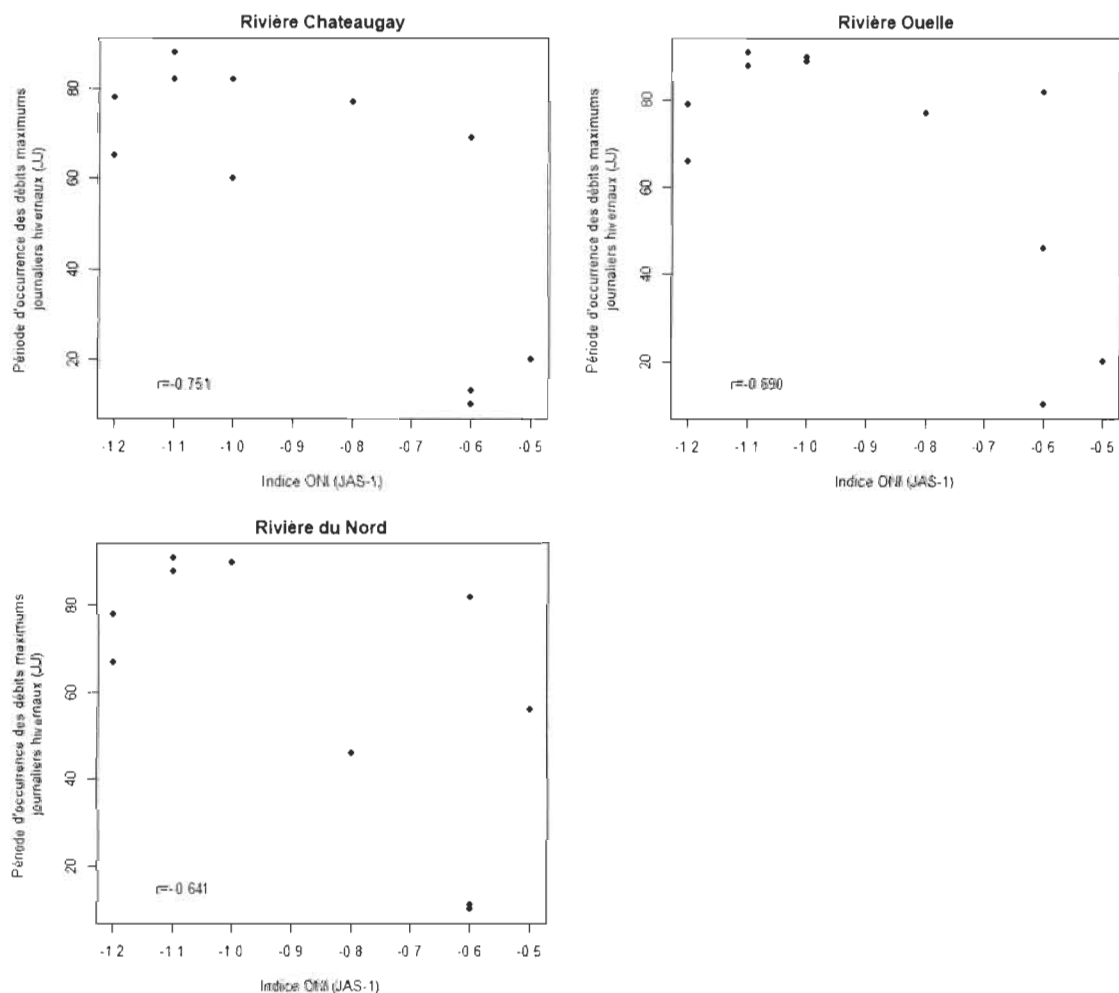


Figure 5.9 Relation entre la période d'occurrence des débits maximums journaliers hivernaux et l'indice ONI lors des épisodes La Niña d'intensité modérée et forte pour la période 1950-2017.

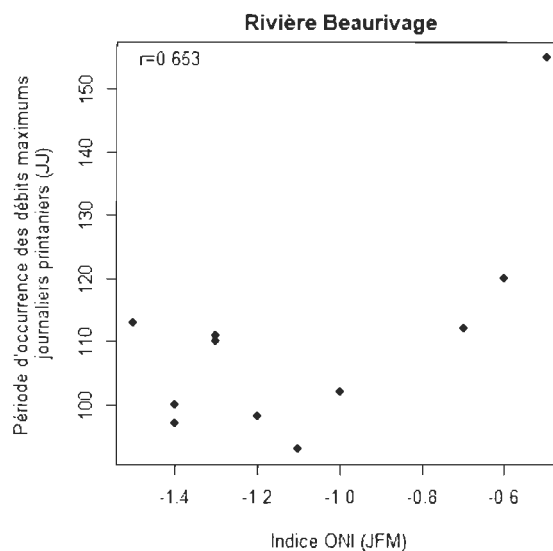


Figure 5.10 Relation entre la période d'occurrence des débits maximums journaliers printaniers et l'indice ONI lors des épisodes La Niña d'intensité modérée et forte pour la période 1950-2017.

5.2.4 Relation entre les débits minimums journaliers saisonniers et les épisodes de La Niña d'intensité modérée à forte

La corrélation entre la magnitude des débits minimums journaliers et les indices des épisodes La Niña est observée presque exclusivement au printemps dans la région du Sud-Ouest (Tableau 5.11, Figures 5.11 et 5.12). Ce sont les indices automnaux et hivernaux de ces épisodes qui sont mieux corrélés aux débits. Cette corrélation est négative, c'est-à-dire que les épisodes intenses de La Niña provoquent une hausse de la magnitude des débits minimums journaliers.

Tableau 5.11

Coefficients de corrélation calculés entre les débits minimums journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices des épisodes La Niña d'intensité modérée à forte pendant la période 1950-2017

| Code | Rivière | Hiver | | | Printemps | | | |
|-------------------------------------|---------------------|-----------------|--------|--------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
| | | JAS-1 | OND-1 | JFM | JAS-1 | OND-1 | JFM | AMJ |
| Région hydroclimatique du Sud-Est | | | | | | | | |
| SE1 | Châteauguay | 0,066 | 0,185 | -0,152 | -0,013 | -0,039 | -0,113 | 0,293 |
| SE2 | Eaton | 0,287 | 0,305 | 0,066 | 0,026 | -0,322 | -0,009 | 0,238 |
| SE3 | Nicolet SW | 0,562* | 0,346 | -0,005 | -0,359 | -0,509 | -0,381 | -0,369 |
| SE4 | Etchemin | 0,187 | 0,164 | 0,000 | 0,125 | 0,042 | -0,081 | -0,049 |
| SE5 | Beaurivage | 0,192 | -0,009 | -0,119 | -0,127 | -0,212 | -0,318 | -0,032 |
| SE6 | Du Sud | 0,055 | 0,117 | -0,036 | 0,095 | 0,071 | 0,012 | 0,399 |
| Région hydroclimatique de l'Est | | | | | | | | |
| E1 | Ouelle | -0,154 | -0,100 | -0,223 | 0,251 | -0,494 | 0,325 | 0,239 |
| E2 | Du Loup | -0,021 | 0,192 | -0,124 | -0,086 | 0,098 | 0,120 | 0,620** |
| E3 | Trois-Pistoles | 0,027 | -0,104 | -0,239 | -0,134 | -0,236 | -0,187 | 0,019 |
| E4 | Rimouski | -0,227 | -0,138 | -0,402 | -0,592* | -0,510 | -0,368 | 0,075 |
| E5 | Matane | -0,323 | -0,075 | -0,118 | 0,101 | -0,368 | 0,464 | 0,304 |
| E6 | Blanche | -0,263 | 0,036 | -0,192 | -0,469 | -0,154 | -0,209 | -0,067 |
| Région hydroclimatique du Sud-Ouest | | | | | | | | |
| SW1 | De La Petite Nation | -0,128 | -0,018 | -0,455 | -0,602** | -0,519 | -0,736** | -0,224 |
| SW2 | Du Nord | 0,033 | 0,015 | -0,321 | -0,464 | -0,560* | -0,767** | -0,430 |
| SW3 | L'Assomption | -0,418 | -0,280 | -0,432 | -0,712** | -0,524* | -0,734** | -0,266 |
| SW4 | Matawin | -0,364 | -0,086 | -0,267 | -0,625** | -0,530* | -0,587* | 0,008 |
| SW5 | Vermillon | -0,603** | -0,201 | -0,293 | -0,464 | -0,254 | -0,437 | 0,078 |

* = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 10 %.

** = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 5 %.

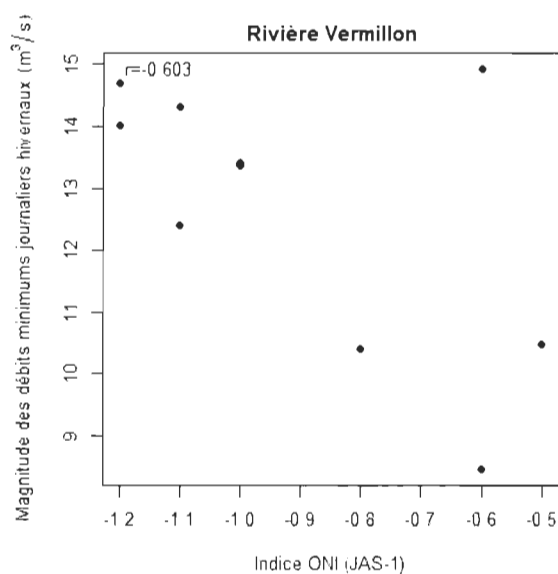


Figure 5.11 Relation entre la magnitude des débits minimums journaliers hivernaux et l'indice ONI lors des épisodes La Niña d'intensité modérée et forte pour la période 1950-2017.

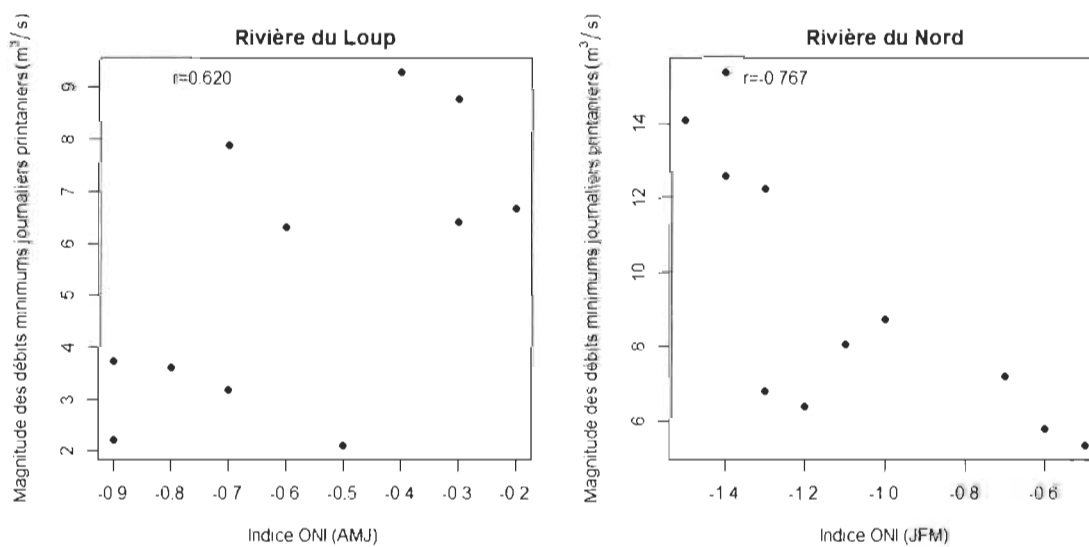


Figure 5.12 Relation entre la magnitude des débits minimums journaliers printaniers et l'indice ONI lors des épisodes La Niña d'intensité modérée et forte pour la période 1950-2017.

5.2.5 Relation entre la période d'occurrence des débits minimums journaliers saisonniers et les épisodes de La Niña d'intensité modérée à forte

Dans les trois régions hydroclimatiques, on observe très peu de relations significatives entre la période d'occurrence des débits minimums journaliers et les indices des épisodes de La Niña, soit trois à l'hiver et trois autres au printemps. À l'hiver, les relations sont toutes négatives. Au printemps, deux sont négatives et une seule est positive (Tableau 5.12 et Figure 5.13).

Tableau 5.12

Coefficients de corrélation calculés entre les périodes d'occurrence des débits minimums journaliers saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices des épisodes La Niña d'intensité modérée à forte pendant la période 1950-2017

| Code | Rivière | Hiver | | | Printemps | | | |
|-------------------------------------|---------------------|---------|---------|--------|-----------|--------|--------|--------|
| | | JAS-1 | OND-1 | JFM | JAS-1 | OND-1 | JFM | AMJ |
| Région hydroclimatique du Sud-Est | | | | | | | | |
| SE1 | Châteauguay | -0,147 | -0,404 | -0,307 | -0,431 | -0,237 | -0,010 | -0,132 |
| SE2 | Eaton | -0,217 | 0,012 | -0,340 | -0,376 | -0,070 | 0,160 | 0,141 |
| SE3 | Nicolet SW | 0,193 | 0,327 | -0,165 | 0,172 | 0,326 | 0,309 | 0,085 |
| SE4 | Etchemin | -0,448 | -0,016 | -0,393 | -0,308 | 0,343 | -0,408 | -0,164 |
| SE5 | Beaurivage | -0,220 | -0,467 | -0,488 | -0,388 | 0,236 | -0,458 | -0,187 |
| SE6 | Du Sud | -0,543* | -0,127 | -0,259 | -0,759** | -0,134 | -0,434 | -0,289 |
| Région hydroclimatique de l'Est | | | | | | | | |
| E1 | Ouelle | -0,112 | -0,576* | -0,405 | -0,401 | -0,135 | 0,148 | 0,101 |
| E2 | Du Loup | 0,078 | -0,173 | -0,338 | -0,524* | 0,117 | -0,197 | 0,062 |
| E3 | Trois-Pistoles | 0,024 | -0,345 | -0,049 | -0,268 | -0,192 | -0,118 | 0,096 |
| E4 | Rimouski | 0,082 | -0,265 | -0,168 | -0,025 | 0,145 | 0,108 | 0,321 |
| E5 | Matane | -0,072 | -0,340 | -0,268 | 0,327 | 0,211 | 0,553* | 0,408 |
| E6 | Blanche | -0,209 | 0,089 | -0,491 | -0,216 | 0,125 | -0,262 | -0,123 |
| Région hydroclimatique du Sud-Ouest | | | | | | | | |
| SW1 | De La Petite Nation | -0,271 | -0,193 | -0,379 | -0,046 | 0,374 | 0,389 | 0,518 |
| SW2 | Du Nord | 0,267 | -0,223 | 0,137 | -0,280 | 0,293 | -0,370 | -0,090 |
| SW3 | L'Assomption | -0,153 | -0,239 | -0,336 | -0,183 | 0,186 | 0,228 | 0,488 |
| SW4 | Matawin | -0,005 | -0,398 | -0,033 | -0,238 | 0,013 | -0,059 | 0,052 |
| SW5 | Vermillon | -0,183 | -0,571* | 0,019 | 0,029 | 0,180 | 0,201 | 0,375 |

* = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 10 %.

** = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 5 %.

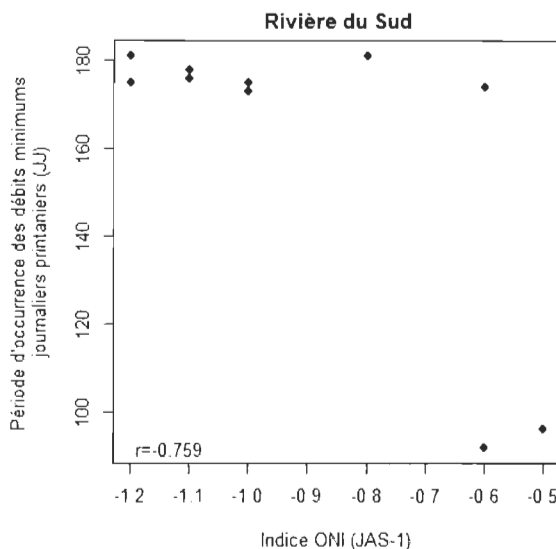


Figure 5.13 Relation entre la période d'occurrence des débits minimums journaliers printaniers et l'indice ONI lors des épisodes La Niña d'intensité modérée et forte pour la période 1950-2017.

5.2.6 Relation entre les indices de la variabilité de l'écoulement et les épisodes de La Niña d'intensité modérée à forte

En ce qui concerne les coefficients de variation, on ne note aucune relation significative à l'hiver alors qu'au printemps, on en observe cinq, dont une négative (Tableau 5.13 et Figure 5.14). Quant aux coefficients d'immodération, la moitié des rivières présentent une corrélation significative positive avec l'indice hivernal des épisodes La Niña dans la région hydroclimatique de l'Est en hiver. Au printemps, deux rivières montrent au moins une relation significative, une positive et une négative (Tableau 5.14, Figures 5.15 et 5.16).

Tableau 5.13

Coefficients de corrélation calculés entre les coefficients de variation saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices des épisodes La Niña d'intensité modérée à forte pendant la période 1950-2017

| Code | Rivière | Hiver | | | Printemps | | | |
|-------------------------------------|---------------------|--------|--------|--------|-----------|---------|--------|----------|
| | | JAS-1 | OND-1 | JFM | JAS-1 | OND-1 | JFM | AMJ |
| Région hydroclimatique du Sud-Est | | | | | | | | |
| SE1 | Châteauguay | -0,292 | -0,354 | -0,412 | -0,031 | -0,431 | -0,381 | -0,678** |
| SE2 | Eaton | -0,265 | -0,269 | -0,275 | -0,427 | -0,180 | -0,001 | -0,121 |
| SE3 | Nicolet SW | -0,076 | -0,389 | -0,091 | -0,146 | 0,232 | -0,187 | -0,246 |
| SE4 | Etchemin | -0,255 | -0,346 | 0,142 | -0,294 | 0,060 | -0,328 | 0,099 |
| SE5 | Beaurivage | -0,335 | -0,238 | -0,244 | 0,110 | 0,704** | -0,052 | -0,093 |
| SE6 | Du Sud | -0,105 | -0,161 | 0,177 | -0,094 | 0,327 | -0,224 | 0,100 |
| Région hydroclimatique de l'Est | | | | | | | | |
| E1 | Ouelle | -0,154 | -0,073 | -0,040 | 0,205 | 0,585* | -0,053 | 0,122 |
| E2 | Du Loup | 0,116 | 0,096 | 0,323 | 0,377 | 0,525* | 0,191 | 0,156 |
| E3 | Trois-Pistoles | 0,152 | 0,209 | 0,292 | 0,319 | 0,353 | 0,146 | 0,149 |
| E4 | Rimouski | 0,214 | 0,288 | 0,449 | 0,390 | 0,226 | 0,246 | 0,006 |
| E5 | Matane | 0,311 | 0,297 | 0,472 | 0,182 | 0,397 | 0,037 | 0,112 |
| E6 | Blanche | 0,050 | 0,108 | 0,277 | 0,229 | 0,236 | 0,026 | -0,004 |
| Région hydroclimatique du Sud-Ouest | | | | | | | | |
| SW1 | De La Petite Nation | 0,303 | 0,365 | 0,510 | 0,433 | 0,470 | 0,209 | -0,020 |
| SW2 | Du Nord | 0,013 | 0,072 | 0,173 | 0,243 | 0,266 | -0,101 | -0,006 |
| SW3 | L'Assomption | 0,149 | 0,148 | 0,224 | 0,151 | 0,373 | -0,161 | 0,100 |
| SW4 | Matawin | 0,322 | 0,383 | 0,462 | 0,356 | 0,586* | 0,106 | 0,104 |
| SW5 | Vermillon | 0,269 | 0,352 | 0,428 | 0,106 | 0,329 | -0,208 | -0,064 |

* = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 10 %.

** = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 5 %.

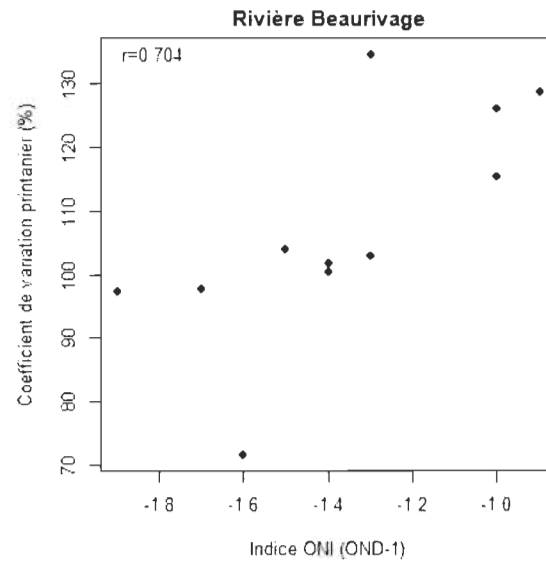


Figure 5.14 Relation entre les coefficients de variation printaniers et l'indice ONI lors des épisodes La Niña d'intensité modérée et forte pour la période 1950-2017.

Tableau 5.14

Coefficients de corrélation calculés entre les coefficients d'immodération saisonniers (hivernaux et printaniers) et les indices des épisodes La Niña d'intensité modérée à forte pendant la période 1950-2017

| Code | Rivière | Hiver | | | Printemps | | | |
|-------------------------------------|---------------------|--------|--------|---------|-----------|--------|---------|----------|
| | | JAS-1 | OND-1 | JFM | JAS-1 | OND-1 | JFM | AMJ |
| Région hydroclimatique du Sud-Est | | | | | | | | |
| SE1 | Châteauguay | -0,458 | -0,360 | -0,378 | 0,097 | 0,119 | -0,109 | -0,386 |
| SE2 | Eaton | -0,377 | -0,233 | -0,222 | -0,359 | 0,009 | -0,154 | -0,366 |
| SE3 | Nicolet SW | -0,250 | -0,282 | -0,038 | -0,228 | 0,077 | -0,047 | 0,206 |
| SE4 | Etchemin | -0,404 | -0,292 | -0,043 | -0,324 | -0,231 | -0,089 | 0,271 |
| SE5 | Beaurivage | -0,480 | -0,306 | -0,229 | -0,083 | 0,361 | -0,007 | -0,197 |
| SE6 | Du Sud | -0,175 | -0,145 | 0,068 | -0,188 | -0,039 | -0,314 | -0,306 |
| Région hydroclimatique de l'Est | | | | | | | | |
| E1 | Ouelle | -0,005 | 0,054 | 0,063 | -0,056 | 0,383 | -0,308 | -0,110 |
| E2 | Du Loup | 0,192 | 0,090 | 0,344 | -0,168 | -0,331 | -0,349 | -0,632** |
| E3 | Trois-Pistoles | 0,333 | 0,401 | 0,522* | -0,039 | -0,050 | -0,200 | -0,048 |
| E4 | Rimouski | 0,445 | 0,478 | 0,617** | 0,380 | 0,099 | 0,104 | -0,181 |
| E5 | Matane | 0,469 | 0,478 | 0,595* | 0,042 | 0,145 | -0,467 | -0,368 |
| E6 | Blanche | 0,221 | 0,291 | 0,475 | 0,353 | 0,059 | -0,084 | -0,040 |
| Région hydroclimatique du Sud-Ouest | | | | | | | | |
| SW1 | De La Petite Nation | 0,206 | 0,323 | 0,419 | 0,718** | 0,540* | 0,610** | 0,271 |
| SW2 | Du Nord | 0,137 | 0,190 | 0,310 | 0,250 | 0,318 | 0,279 | 0,375 |
| SW3 | L'Assomption | 0,269 | 0,286 | 0,329 | 0,274 | 0,203 | 0,038 | 0,248 |
| SW4 | Matawin | 0,306 | 0,354 | 0,426 | 0,521 | 0,290 | 0,265 | -0,141 |
| SW5 | Vermillon | 0,278 | 0,340 | 0,404 | 0,110 | -0,106 | -0,056 | -0,220 |

* = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 10 %.

** = valeur du coefficient de corrélation significative au seuil de 5 %.

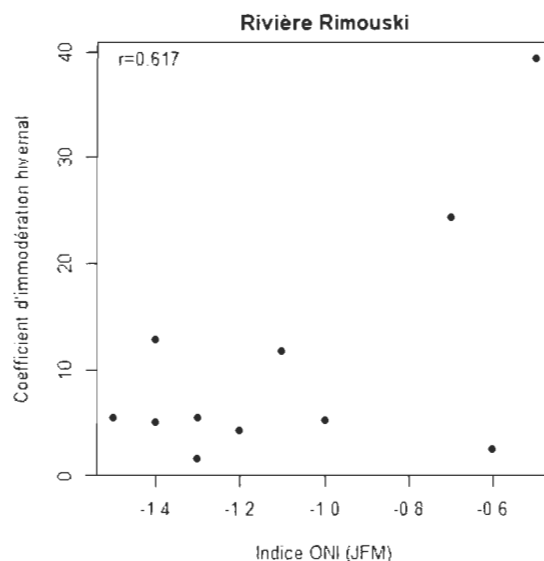


Figure 5.15 Relation entre les coefficients d'immodération hivernaux et l'indice ONI lors des épisodes La Niña d'intensité modérée et forte pour la période 1950-2017.

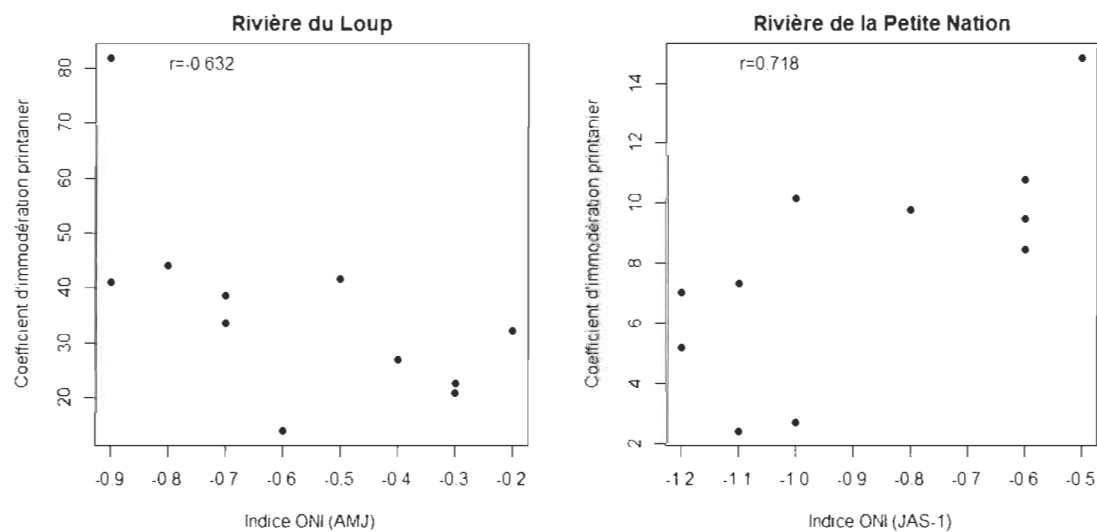


Figure 5.16 Relation entre les coefficients d'immodération printaniers et l'indice ONI lors des épisodes La Niña d'intensité modérée et forte pour la période 1950-2017.

CHAPITRE VI

SYNTHÈSE DES RÉSULTATS ET DISCUSSION

Afin de pouvoir répondre aux différentes questions soulevées dans la problématique, notre discussion sera articulée autour de six points suivants :

- 1) Comparaison des résultats obtenus avec la série complète des indices de l'OA à ceux obtenus exclusivement avec des séries d'intensité des épisodes El Niño et La Niña analysées séparément.
- 2) Comparaison des résultats obtenus en fonction de degrés d'intensité des épisodes El Niño et La Niña analysés séparément.
- 3) Comparaison des résultats en fonction des indices saisonniers des épisodes El Niño et La Niña
- 4) Comparaison de l'influence des intensités des épisodes El Niño et La Niña en fonction des saisons au Québec méridional
- 5) Comparaison de l'influence des épisodes El Niño et La Niña sur les trois régions hydroclimatiques du Québec méridional
- 6) Comparaison des résultats en fonction des caractéristiques des débits journaliers hivernaux et printaniers

D'abord, trois séries seront comparées afin de vérifier si on obtient de meilleurs résultats en utilisant l'ensemble des années ou en utilisant que les événements El Niño et La Niña. Ensuite, nous comparerons les séries de l'ensemble des épisodes El Niño/La Niña aux séries discréditant les événements d'intensité faible afin de vérifier si les épisodes de plus faible intensité atténuent l'effet des plus intenses. Puis, nous avons comparé les résultats obtenus selon les différents indices saisonniers afin de déterminer à quelle saison l'intensité de l'indice affectera le plus les caractéristiques des débits.

Nous discuterons ensuite de quelle saison est la plus affectée par les épisodes El Niño/La Niña et nous déterminerons dans quelle région hydroclimatique les effets de l'OA sont le plus observés. Finalement, nous discuterons de l'effet de ces phénomènes climatiques sur les caractéristiques des débits hivernaux et printaniers au Québec méridional.

6.1 Comparaison des séries

Afin de vérifier l'influence de l'intensité des épisodes El Niño et La Niña sur les caractéristiques des débits au Québec, on a comparé le pourcentage de rivières significativement corrélées aux indices d'ONI en fonction des séries complètes et des séries constituées seulement des épisodes El Niño et La Niña. Les résultats de cette comparaison sont consignés dans le tableau 6.1.

Tableau 6.1

Pourcentage (%) des rivières significativement corrélées en fonction des séries des indices ONI pendant la période 1950-2017

| Caractéristiques des débits | Complet | El Niño | La Niña |
|-----------------------------|---------|---------|---------|
| Qm | 14,3 | 28,6 | 1,7 |
| Qmax | 0,8 | 29,4 | 7,6 |
| POmax | 11,8 | 23,5 | 2,5 |
| Qmin | 5,0 | 20,2 | 5,9 |
| POmin | 5,9 | 15,1 | 3,4 |
| CV | 6,7 | 7,6 | 11,8 |
| CI | 7,6 | 10,9 | 12,6 |
| Total : | 7,4 | 19,3 | 6,5 |

NB : Total représente le pourcentage de coefficients de corrélation significatif considérant l'ensemble des résultats obtenues sans distinction selon la caractéristique de débit.

En tenant compte de toutes les caractéristiques des débits et de deux saisons, il ressort de ce tableau que le pourcentage de rivières significativement corrélées est plus élevé avec les épisodes El Niño (19,3 %) qu'avec les épisodes La Niña (6,5 %) et les deux épisodes confondus (7,4 %). Il s'ensuit que l'utilisation classique des séries

complètes masque plus l'influence des épisodes El Niño que celle de La Niña. De plus, ce résultat démontre l'existence d'un lien significatif entre l'intensité des épisodes El Niño et La Niña sur les caractéristiques des débits au Québec. La faible influence des épisodes La Niña par rapport à celle d'El Niño pourrait s'expliquer en partie par le fait que le courant chaud El Niño a une extension spatiale beaucoup plus importante que celle du courant froid La Niña. Ainsi, l'influence planétaire induite par le courant El Niño sur la variabilité des variables hydroclimatiques serait plus importante que celle de La Niña. L'influence de ce dernier courant marin s'estomperait rapidement au fur et à mesure qu'on s'éloigne de l'océan Pacifique tropical.

6.2 Comparaison de l'influence de degrés d'intensité des épisodes El Niño et La Niña

Afin de vérifier l'hypothèse que l'influence des épisodes les plus intenses est atténuée par les épisodes de faible intensité, on a comparé les résultats obtenus pour les séries incluant les épisodes de faible intensité et celles les excluant. En ce qui concerne les épisodes El Niño dont les résultats sont présentés au tableau 6.2, l'inclusion des épisodes de faible intensité augmente le pourcentage des rivières corrélées avec El Niño en hiver, mais, en revanche, cette inclusion diminue ce pourcentage au printemps. Il s'ensuit que le degré d'intensité des épisodes El Niño n'a aucune influence en hiver. Par contre au printemps, l'influence de ces épisodes se manifeste surtout lors des événements d'intensité modérée à très forte. Quant aux épisodes La Niña (Tableau 6.3), on observe la même tendance. En effet, l'influence du degré d'intensité des épisodes se manifeste plus au printemps qu'en hiver. À la lumière de ces considérations, on observe sans le moindre doute l'affaiblissement de l'influence des épisodes de faible intensité au printemps au Québec. Pour expliquer cet affaiblissement, il faut rappeler que les phénomènes El Niño et La Niña commencent à se former après l'été austral (janvier à mars) et se développent en hiver austral (de juin à septembre) jusqu'au printemps austral. Pour des épisodes de faible intensité, leur influence s'estompe rapidement dans le temps et dans l'espace. Ceci expliquerait ainsi l'affaiblissement de leur influence au printemps au Québec, région relativement éloignée de la zone tropicale.

Tableau 6.2

Pourcentage (%) de rivières significativement corrélées selon le degré d'intensité des épisodes El Niño pendant la période 1950-2017

| Caractéristiques des débits | Hiver | | Printemps | |
|-----------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| | Intensité faible à très forte | Intensité modérée à très forte | Intensité faible à très forte | Intensité modérée à très forte |
| Qm | 45,1 | 31,4 | 16,2 | 11,8 |
| Qmax | 58,8 | 29,4 | 7,4 | 27,9 |
| POmax | 47,1 | 9,8 | 5,9 | 2,9 |
| Qmin | 39,2 | 13,7 | 5,9 | 8,8 |
| POmin | 13,7 | 21,6 | 16,2 | 7,4 |
| CV | 9,8 | 2,0 | 5,9 | 20,6 |
| CI | 19,6 | 2,0 | 4,4 | 13,2 |
| Total : | 33,3 | 15,7 | 8,8 | 13,2 |

NB : Total représente le pourcentage de coefficients de corrélation significatif considérant l'ensemble des résultats obtenues sans distinction selon la caractéristique de débit.

Tableau 6.3

Pourcentage de rivières significativement corrélées (%) en fonction de degré d'intensité des épisodes La Niña pendant la période 1950-2017 ($\alpha = 0.1$)

| Caractéristiques des débits | Hiver | | Printemps | |
|-----------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|
| | Intensité faible à forte | Intensité modérée à forte | Intensité faible à forte | Intensité modérée à forte |
| Qm | 0,0 | 3,9 | 2,9 | 23,5 |
| Qmax | 17,6 | 2,0 | 0,0 | 2,9 |
| POmax | 3,9 | 15,7 | 1,5 | 8,8 |
| Qmin | 2,0 | 3,9 | 8,8 | 17,6 |
| POmin | 5,9 | 5,9 | 1,5 | 4,4 |
| CV | 17,6 | 0,0 | 7,4 | 7,4 |
| CI | 27,5 | 5,9 | 1,5 | 5,9 |
| Total : | 10,6 | 5,3 | 3,4 | 10,1 |

NB : Total représente le pourcentage de coefficients de corrélation significatif considérant l'ensemble des résultats obtenues sans distinction selon la caractéristique de débit.

6.3 Comparaison de l'influence des épisodes El Niño et La Niña en fonction des indices saisonniers d'ONI et des caractéristiques des débits journaliers

En ce qui concerne El Niño, les résultats de cette comparaison sont présentés aux tableaux 6.4 en hiver et 6.5 au printemps. Les indices saisonniers d'ONI les plus fréquemment corrélés aux débits hivernaux des rivières sont les indices hivernaux (JFM) et automnaux (OND-1). Ils le sont plus fréquemment aux débits moyens journaliers, aux débits maximums journaliers et leurs périodes d'occurrence ainsi qu'aux débits minimums journaliers et leurs périodes d'occurrence. Néanmoins, pour cette dernière caractéristique, elle est beaucoup moins influencée par des épisodes de faible intensité que ceux de forte intensité. Au printemps, si on tient compte de tous les épisodes de différentes intensités, ce sont les indices d'ONI hivernaux (JFM) et automnaux (OND-1) qui sont les plus fréquemment corrélés aux débits printaniers des rivières. Ils le sont surtout aux périodes d'occurrence des débits minimums journaliers et, dans une certaine mesure, aux débits moyens journaliers. Mais si on exclut les épisodes de faible intensité, ce sont les indices hivernaux (JFM) et printaniers (AMJ) qui sont les plus fréquemment corrélés aux débits maximums journaliers et aux coefficients de variation. À noter que les indices estivaux (JAS-1) sont aussi fréquemment corrélés aux deux indices hydrologiques (CV et CI) de la variabilité de l'écoulement.

En ce qui concerne le phénomène La Niña, en hiver (Tableau 6.6), les indices automnaux (OND-1) et, dans une certaine mesure, les indices estivaux (JAS-1) sont fréquemment corrélés aux débits maximums journaliers et aux deux indices hydrologiques de la variabilité de l'écoulement. Toutefois, si on exclut les épisodes de faible intensité, les indices estivaux deviennent les plus fréquemment corrélés aux périodes d'occurrence des débits maximums journaliers. Au printemps (Tableau 6.7), ce sont les indices automnaux (OND-1) qui sont fréquemment corrélés aux débits maximums journaliers et aux deux indices hydrologiques (CV et CI) de la variabilité de l'écoulement. Si on exclut les épisodes de faible intensité, ces indices automnaux deviennent beaucoup plus fréquemment corrélés aux débits moyens journaliers.

Tableau 6.4

Pourcentage (%) de rivières significativement corrélées aux épisodes El Niño en hiver pendant la période 1950-2017

| Caractéristiques des débits | Intensité faible à très forte | | | Intensité modérée à très forte | | |
|-----------------------------|-------------------------------|-------|------|--------------------------------|-------|------|
| | JAS-1 | OND-1 | JFM | JAS-1 | OND-1 | JFM |
| Qm | 11,8 | 58,8 | 64,7 | 0,0 | 58,8 | 35,3 |
| Qmax | 29,4 | 58,8 | 88,2 | 0,0 | 52,9 | 35,3 |
| POmax | 29,4 | 47,1 | 64,7 | 5,9 | 17,6 | 5,9 |
| Qmin | 17,6 | 47,1 | 52,9 | 0,0 | 23,5 | 17,6 |
| POmin | 23,5 | 5,9 | 11,8 | 29,4 | 17,6 | 17,6 |
| CV | 5,9 | 5,9 | 17,6 | 0,0 | 0,0 | 5,9 |
| CI | 5,9 | 29,4 | 23,5 | 5,9 | 0,0 | 0,0 |
| Total : | 17,6 | 36,1 | 46,2 | 5,9 | 24,4 | 16,8 |

NB : Total représente le pourcentage de coefficients de corrélation significatif considérant l'ensemble des résultats obtenues sans distinction selon la caractéristique de débit.

Tableau 6.5

Pourcentage (%) de rivières significativement corrélées aux épisodes El Niño au printemps pendant la période 1950-2017 ($\alpha = 0.1$)

| Caractéristiques des débits | Intensité faible à très forte | | | | Intensité modérée à forte | | | |
|-----------------------------|-------------------------------|-------|------|------|---------------------------|-------|------|------|
| | JAS-1 | OND-1 | JFM | AMJ | JAS-1 | OND-1 | JFM | AMJ |
| Qm | 23,5 | 29,4 | 11,8 | 0,0 | 5,9 | 23,5 | 17,6 | 0,0 |
| Qmax | 0,0 | 5,9 | 11,8 | 11,8 | 5,9 | 17,6 | 35,3 | 52,9 |
| POmax | 0,0 | 0,0 | 11,8 | 11,8 | 0,0 | 0,0 | 11,8 | 0,0 |
| Qmin | 5,9 | 11,8 | 5,9 | 0,0 | 5,9 | 17,6 | 11,8 | 0,0 |
| POmin | 5,9 | 17,6 | 41,2 | 0,0 | 0,0 | 23,5 | 5,9 | 0,0 |
| CV | 5,9 | 0,0 | 5,9 | 11,8 | 29,4 | 0,0 | 11,8 | 41,2 |
| CI | 0,0 | 0,0 | 5,9 | 11,8 | 23,5 | 17,6 | 5,9 | 5,9 |
| Total : | 5,9 | 9,2 | 13,4 | 6,7 | 10,1 | 14,3 | 14,3 | 14,3 |

NB : Total représente le pourcentage de coefficients de corrélation significatif considérant l'ensemble des résultats obtenues sans distinction selon la caractéristique de débit.

Tableau 6.6

Pourcentage (%) de rivières significativement corrélées aux épisodes La Niña en hiver pendant la période 1950-2017

| Caractéristiques des débits | Intensité faible à forte | | | Intensité modérée à forte | | |
|-----------------------------|--------------------------|-------|------|---------------------------|-------|------|
| | JAS-1 | OND-1 | JFM | JAS-1 | OND-1 | JFM |
| Qm | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 5,9 | 0,0 | 5,9 |
| Qmax | 11,8 | 23,5 | 17,6 | 0,0 | 0,0 | 5,9 |
| POmax | 11,8 | 0,0 | 0,0 | 47,1 | 0,0 | 0,0 |
| Qmin | 5,9 | 0,0 | 0,0 | 11,8 | 0,0 | 0,0 |
| POmin | 5,9 | 5,9 | 5,9 | 5,9 | 11,8 | 0,0 |
| CV | 17,6 | 23,5 | 11,8 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| CI | 29,4 | 35,3 | 17,6 | 0,0 | 0,0 | 17,6 |
| Total : | 11,8 | 12,6 | 7,6 | 10,1 | 1,7 | 4,2 |

NB : Total représente le pourcentage de coefficients de corrélation significatif considérant l'ensemble des résultats obtenues sans distinction selon la caractéristique de débit.

Tableau 6.7

Pourcentage (%) de rivières significativement corrélées aux épisodes La Niña au printemps pendant la période 1950-2017 ($\alpha = 0.1$)

| Caractéristiques des débits | Intensité faible à forte | | | | Intensité modérée à forte | | | |
|-----------------------------|--------------------------|-------|------|-----|---------------------------|-------|------|------|
| | JAS-1 | OND-1 | JFM | AMJ | JAS-1 | OND-1 | JFM | AMJ |
| Qm | 5,9 | 5,9 | 0,0 | 0,0 | 23,5 | 23,5 | 47,1 | 0,0 |
| Qmax | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 5,9 | 0,0 | 5,9 | 0,0 |
| POmax | 0,0 | 5,9 | 0,0 | 0,0 | 11,8 | 0,0 | 5,9 | 17,6 |
| Qmin | 5,9 | 17,6 | 11,8 | 0,0 | 23,5 | 17,6 | 23,5 | 5,9 |
| POmin | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 5,9 | 11,8 | 0,0 | 5,9 | 0,0 |
| CV | 0,0 | 29,4 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 23,5 | 0,0 | 5,9 |
| CI | 0,0 | 5,9 | 0,0 | 0,0 | 5,9 | 5,9 | 5,9 | 5,9 |
| Total : | 1,7 | 9,2 | 1,7 | 0,8 | 11,8 | 10,1 | 13,4 | 5,0 |

NB : Total représente le pourcentage de coefficients de corrélation significatif considérant l'ensemble des résultats obtenues sans distinction selon la caractéristique de débit.

6.4 Influence des saisons

En ce qui concerne le phénomène El Niño (Tableau 6.8), les épisodes El Niño sont plus fréquemment corrélés aux débits hivernaux qu'aux débits printaniers. Pour La Niña, si on exclut les épisodes de faible intensité, ces épisodes deviennent plus fréquemment corrélés aux débits printaniers qu'aux débits hivernaux (Tableau 6.8). Ceci s'explique probablement en raison de l'affaiblissement de l'influence des épisodes de l'OA de faible intensité au printemps comme on l'avait déjà invoqué.

Tableau 6.8

Pourcentage de rivières significativement corrélées (%) par saison pendant la période 1950-2017 ($\alpha = 0.1$)

| Caractéristiques des débits | El Niño | | | | La Niña | | | |
|-----------------------------|-------------------------------|-----------|--------------------------------|-----------|--------------------------|-----------|----------------------------|-----------|
| | Intensité faible à très forte | | Intensité modérée à très forte | | Intensité faible à forte | | Intensité modérée et forte | |
| | Hiver | Printemps | Hiver | Printemps | Hiver | Printemps | Hiver | Printemps |
| Qm | 45,1 | 16,2 | 31,4 | 11,8 | 0,0 | 2,9 | 3,9 | 23,5 |
| Qmax | 58,8 | 7,4 | 29,4 | 27,9 | 17,6 | 0,0 | 2,0 | 2,9 |
| POmax | 47,1 | 5,9 | 9,8 | 2,9 | 3,9 | 1,5 | 15,7 | 8,8 |
| Qmin | 39,2 | 5,9 | 13,7 | 8,8 | 2,0 | 8,8 | 3,9 | 17,6 |
| POmin | 13,7 | 16,2 | 21,6 | 7,4 | 5,9 | 1,5 | 5,9 | 4,4 |
| CV | 9,8 | 5,9 | 2,0 | 20,6 | 17,6 | 7,4 | 0,0 | 7,4 |
| CI | 19,6 | 4,4 | 2,0 | 13,2 | 27,5 | 1,5 | 5,9 | 5,9 |
| Total : | 33,3 | 8,8 | 15,7 | 13,2 | 10,6 | 3,4 | 5,3 | 10,1 |

NB : Total représente le pourcentage de coefficients de corrélation significatif considérant l'ensemble des résultats obtenues sans distinction selon la caractéristique de débit.

6.5 Influence des régions hydroclimatiques

Afin de vérifier quelle est la région hydroclimatique la plus réactive aux phénomènes El Niño et La Niña, on a comparé la proportion des rivières significativement corrélées à ces deux phénomènes dans les trois régions hydroclimatiques. En ce qui concerne le phénomène El Niño, en hiver, il est plus fréquemment corrélé aux

caractéristiques des débits journaliers dans la région du Sud-Ouest que dans les deux autres régions hydroclimatiques (Tableau 6.9), à l'exception des magnitudes moyennes des débits journaliers et des périodes d'occurrence des débits minimums journaliers. Au printemps, l'influence de ce phénomène devient comparable dans les régions hydroclimatiques de l'Est et du Sud-Ouest dépendamment des caractéristiques des débits (Tableau 6.10). Quant au phénomène La Niña, en hiver, il est plus fréquemment corrélé aux caractéristiques des débits dans la région du Sud-Est que dans les deux régions hydroclimatiques (Tableau 6.11). En revanche, au printemps, son influence devient globalement plus marquée dans ces deux dernières régions hydroclimatiques que dans la première (Tableau 6.12).

Tableau 6.9

Comparaison des pourcentages des coefficients de corrélation significatifs entre les trois régions hydroclimatiques lors des hivers El Niño pendant la période 1950-2017

| Caractéristiques des débits | Intensité faible à très forte | | | Intensité modérée à très forte | | |
|-----------------------------|-------------------------------|------|-----------|--------------------------------|------|-----------|
| | Sud-Est | Est | Sud-Ouest | Sud-Est | Est | Sud-Ouest |
| Qm | 50,0 | 38,9 | 46,7 | 27,8 | 33,3 | 33,3 |
| Qmax | 50,0 | 55,6 | 73,3 | 11,1 | 22,2 | 60,0 |
| POmax | 33,3 | 38,9 | 73,3 | 0,0 | 11,1 | 20,0 |
| Qmin | 50,0 | 16,7 | 53,3 | 5,6 | 16,7 | 20,0 |
| POmin | 11,1 | 27,8 | 0,0 | 11,1 | 44,4 | 6,7 |
| CV | 0,0 | 11,1 | 20,0 | 0,0 | 0,0 | 6,7 |
| CI | 0,0 | 16,7 | 46,7 | 0,0 | 5,6 | 0,0 |
| Total : | 27,8 | 29,4 | 44,8 | 7,9 | 19,0 | 21,0 |

NB : Total représente le pourcentage de coefficients de corrélation significatif considérant l'ensemble des résultats obtenues sans distinction selon la caractéristique de débit.

Tableau 6.10

Comparaison des pourcentages des coefficients de corrélation significatifs entre les régions hydroclimatiques lors des printemps El Niño pendant la période 1950-2017

| Caractéristiques des débits | Intensité faible à très forte | | | Intensité modérée à très forte | | |
|-----------------------------|-------------------------------|------|-----------|--------------------------------|------|-----------|
| | Sud-Est | Est | Sud-Ouest | Sud-Est | Est | Sud-Ouest |
| Qm | 12,5 | 0,0 | 40,0 | 0,0 | 0,0 | 40,0 |
| Qmax | 0,0 | 16,7 | 5,0 | 16,7 | 20,8 | 50,0 |
| POmax | 4,2 | 8,3 | 5,0 | 8,3 | 0,0 | 0,0 |
| Qmin | 0,0 | 0,0 | 20,0 | 0,0 | 16,7 | 10,0 |
| POmin | 12,5 | 33,3 | 0,0 | 0,0 | 16,7 | 5,0 |
| CV | 12,5 | 4,2 | 0,0 | 8,3 | 41,7 | 10,0 |
| CI | 8,3 | 4,2 | 0,0 | 8,3 | 25,0 | 5,0 |
| Total : | 7,1 | 9,5 | 10,0 | 6,0 | 17,3 | 17,1 |

NB : Total représente le pourcentage de coefficients de corrélation significatif considérant l'ensemble des résultats obtenues sans distinction selon la caractéristique de débit.

Tableau 6.11

Comparaison des pourcentages des coefficients de corrélation significatifs entre les régions hydroclimatiques lors des hivers La Niña pendant la période 1950-2017 ($\alpha = 0.1$)

| Caractéristiques des débits | Intensité faible à forte | | | Intensité modérée à forte | | |
|-----------------------------|--------------------------|-----|-----------|---------------------------|------|-----------|
| | Sud-Est | Est | Sud-Ouest | Sud-Est | Est | Sud-Ouest |
| Qm | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 11,1 | 0,0 |
| Qmax | 50,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 5,6 | 0,0 |
| POmax | 11,1 | 0,0 | 0,0 | 33,3 | 5,6 | 6,7 |
| Qmin | 0,0 | 5,6 | 0,0 | 5,6 | 0,0 | 6,7 |
| POmin | 16,7 | 0,0 | 0,0 | 5,6 | 5,6 | 6,7 |
| CV | 44,4 | 5,6 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| CI | 77,8 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 16,7 | 0,0 |
| Total : | 28,6 | 1,6 | 0,0 | 6,3 | 6,3 | 2,9 |

NB : Total représente le pourcentage de coefficients de corrélation significatif considérant l'ensemble des résultats obtenues sans distinction selon la caractéristique de débit.

Tableau 6.12

Comparaison des pourcentages des coefficients de corrélation significatifs entre les trois régions hydroclimatiques lors des printemps La Niña pendant la période 1950-2017 ($\alpha = 0.1$)

| Caractéristiques des débits | Intensité faible à forte | | | Intensité modérée à forte | | |
|-----------------------------|--------------------------|-----|-----------|---------------------------|------|-----------|
| | Sud-Est | Est | Sud-Ouest | Sud-Est | Est | Sud-Ouest |
| Qm | 4,2 | 0,0 | 5,0 | 0,0 | 33,3 | 40,0 |
| Qmax | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 4,2 | 0,0 | 5,0 |
| POmax | 0,0 | 0,0 | 5,0 | 16,7 | 4,2 | 5,0 |
| Qmin | 12,5 | 4,2 | 10,0 | 0,0 | 8,3 | 50,0 |
| POmin | 4,2 | 0,0 | 0,0 | 4,2 | 8,3 | 0,0 |
| CV | 4,2 | 0,0 | 20,0 | 8,3 | 8,3 | 5,0 |
| CI | 4,2 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 4,2 | 15,0 |
| Total : | 4,2 | 0,6 | 5,7 | 4,8 | 9,5 | 17,1 |

NB : Total représente le pourcentage de coefficients de corrélation significatif considérant l'ensemble des résultats obtenues sans distinction selon la caractéristique de débit.

6.6 Analyse de la nature de l'influence des épisodes El Niño et La Niña sur les caractéristiques des débits journaliers

En ce qui concerne El Niño, en hiver (Tableau 6.13), il est majoritairement corrélé positivement aux débits moyens journaliers, à la magnitude et à la période d'occurrence des débits maximums journaliers et à la magnitude des débits minimums journaliers. Lorsque l'intensité des épisodes El Niño augmente, les valeurs de ces caractéristiques des débits augmentent aussi en raison de la hausse de la fréquence des précipitations sous forme liquide en hiver. En effet, la hausse de la fréquence des pluies hivernales favorise le ruissellement du fait que le sol est gelé et/ou couvert de neige. La hausse du ruissellement provoque une hausse de la magnitude des débits des rivières. Quant aux périodes d'occurrence des débits maximums journaliers, ils surviennent tardivement dans la saison en raison probablement à la fois de la fonte précoce de neige et des effets cumulatifs de pluies à la fin de l'hiver. La hausse du ruissellement provoque aussi dans une certaine mesure celle de la variabilité interannuelle et de l'amplitude de débits. En revanche, la hausse progressive des débits durant la saison hivernale favorise plutôt une occurrence hâtive des débits minimums journaliers. C'est ce qui explique une

corrélation négative entre cette caractéristique des débits minimums et les épisodes El Niño. Cette tendance se reproduit au printemps, mais avec une intensité relativement faible.

Tableau 6.13

Comparaison des pourcentages (%) des valeurs positives et négatives des coefficients de corrélation calculés entre les épisodes El Niño et les caractéristiques des débits journaliers pendant la période 1950-2017

| Caractéristiques des débits | El Niño d'intensité faible à très forte | | | | El Niño d'intensité modérée à très forte | | | |
|-----------------------------|---|------|-----------|-----|--|------|-----------|-----|
| | Hiver | | Printemps | | Hiver | | Printemps | |
| | + | - | + | - | + | - | + | - |
| Qm | 45,1 | 0,0 | 11,8 | 4,4 | 31,4 | 0,0 | 11,8 | 0,0 |
| Qmax | 58,8 | 0,0 | 7,4 | 0,0 | 29,4 | 0,0 | 27,9 | 0,0 |
| POmax | 47,1 | 0,0 | 0,0 | 5,9 | 9,8 | 0,0 | 0,0 | 2,9 |
| Qmin | 39,2 | 0,0 | 5,9 | 0,0 | 13,7 | 0,0 | 8,8 | 0,0 |
| POmin | 0,0 | 13,7 | 16,2 | 0,0 | 0,0 | 21,6 | 7,4 | 0,0 |
| CV | 9,8 | 0,0 | 5,9 | 0,0 | 2,0 | 0,0 | 14,7 | 5,9 |
| CI | 19,6 | 0,0 | 4,4 | 0,0 | 2,0 | 0,0 | 5,9 | 7,4 |
| Total : | 31,4 | 2,0 | 7,7 | 1,5 | 12,6 | 3,1 | 11,5 | 2,4 |

NB : Total représente le pourcentage de coefficients de corrélation significatif considérant l'ensemble des résultats obtenues sans distinction selon la caractéristique de débit.

+ : Coefficient de corrélation positif

- : Coefficient de corrélation négatif

Quant au phénomène La Niña, il est majoritairement corrélé négativement aux magnitudes des débits moyens et minimums journaliers au printemps (Tableau 6.14) en raison d'un couvert nival plus important que durant les années El Niño. En hiver, la diminution de la fréquence du ruissellement favoriserait un écart relativement important des débits minimums entre le début et la fin de la saison hivernale. Il s'ensuit une corrélation négative entre les épisodes La Niña et les deux indices de la variabilité de l'écoulement (CV et CI).

Tableau 6.14

Comparaison des pourcentages (%) des valeurs positives et négatives des coefficients de corrélation calculés entre les épisodes La Niña et les caractéristiques des débits journaliers pendant la période 1950-2017

| Caractéristiques des débits | La Niña d'intensité faible à forte | | | | La Niña d'intensité modérée à forte | | | |
|-----------------------------|------------------------------------|------|-----------|-----|-------------------------------------|------|-----------|------|
| | Hiver | | Printemps | | Hiver | | Printemps | |
| | + | - | + | - | + | - | + | - |
| Qm | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 2,9 | 3,9 | 0,0 | 0,0 | 23,5 |
| Qmax | 0,0 | 17,6 | 0,0 | 0,0 | 2,0 | 0,0 | 0,0 | 2,9 |
| POmax | 0,0 | 3,9 | 0,0 | 1,5 | 0,0 | 15,7 | 4,4 | 4,4 |
| Qmin | 2,0 | 0,0 | 2,9 | 5,9 | 2,0 | 2,0 | 1,5 | 16,2 |
| POmin | 0,0 | 5,9 | 0,0 | 1,5 | 0,0 | 5,9 | 1,5 | 2,9 |
| CV | 0,0 | 17,6 | 7,4 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 5,9 | 1,5 |
| CI | 0,0 | 27,5 | 1,5 | 0,0 | 5,9 | 0,0 | 4,4 | 1,5 |
| Total : | 0,3 | 10,4 | 1,8 | 1,8 | 2,0 | 3,4 | 2,7 | 8,0 |

NB : Total représente le pourcentage de coefficients de corrélation significatif considérant l'ensemble des résultats obtenues sans distinction selon la caractéristique de débit.

+: Coefficient de corrélation positif

- : Coefficient de corrélation négatif

La nature de l'influence des intensités des épisodes El Niño et La Niña permet d'esquisser un schéma conceptuel général sur les mécanismes par lesquels ces épisodes influencent la variabilité spatio-temporelle des caractéristiques des débits au Québec. Durant les années El Niño, le front polaire se situe plus fréquemment au nord du Québec. Cette position favorise l'invasion fréquente de l'air chaud du sud. Cette invasion entraîne ainsi une hausse des températures et de la fréquence des pluies en hiver et au printemps. Il en résulte une hausse de la magnitude des débits, une occurrence précoce des débits minimums, mais tardive des débits maximums ainsi qu'une forte variabilité des débits (Figure 6.1). Ce schéma se vérifie beaucoup plus en hiver qu'au printemps au Québec en raison probablement de l'affaiblissement de l'influence des épisodes El Niño au printemps. Le schéma inverse s'applique aux années La Niña (Figure 6.2). En effet, durant ces années, le front polaire balaie fréquemment le Québec. Il en résulte une baisse des températures, mais, en revanche, une hausse des quantités de neige générées par des cyclones ou dépressions associés au front polaire. Au printemps, la fonte de cette neige favorise une hausse de la magnitude des débits. Cependant, comme on l'a démontré, l'influence des épisodes La Niña est moins marquée que celle d'El Niño aussi bien en hiver qu'au printemps.

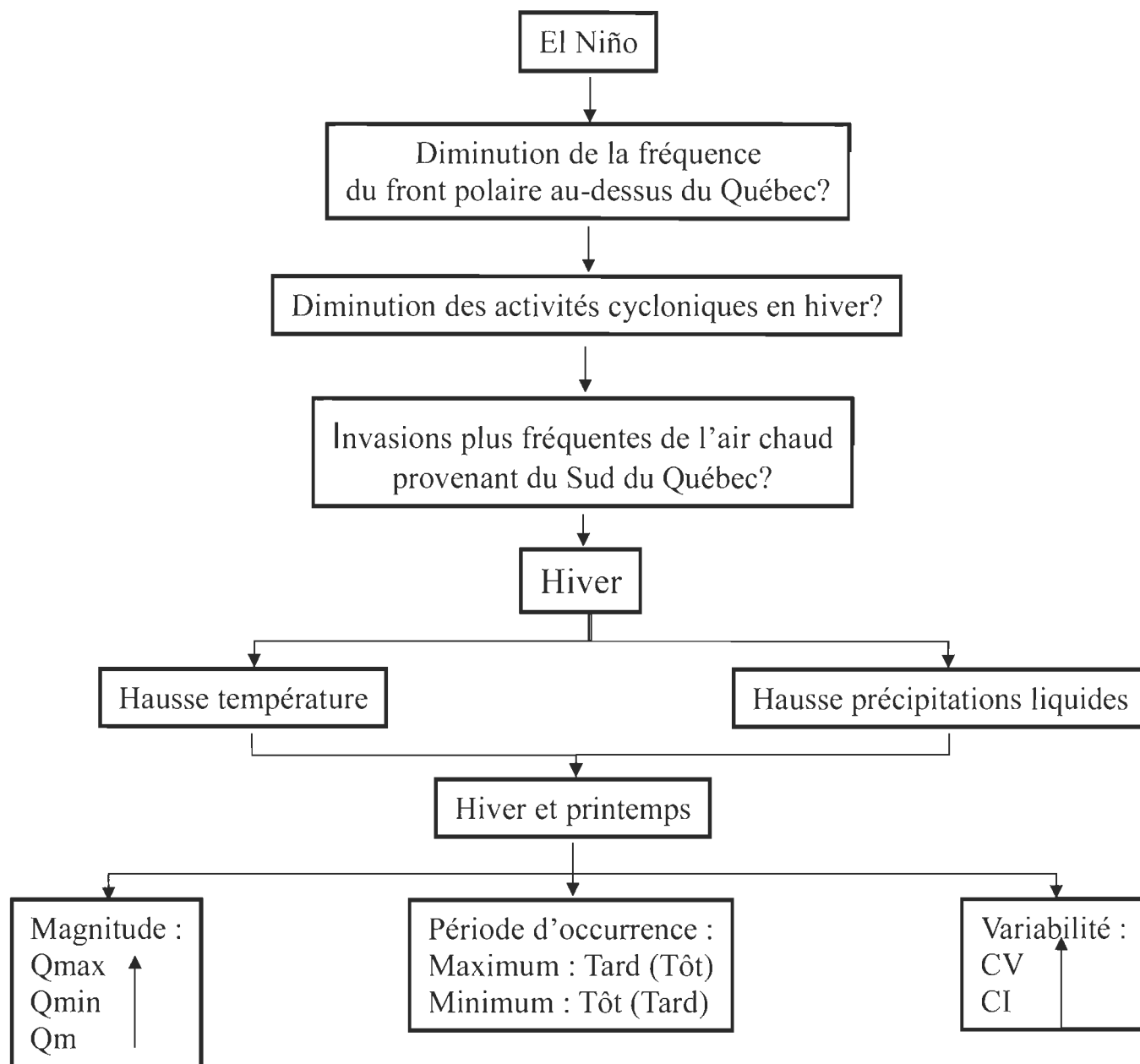


Figure 6.1 Schéma conceptuel de l'influence des épisodes d'El Niño sur les caractéristiques des débits en hiver et au printemps au Québec.

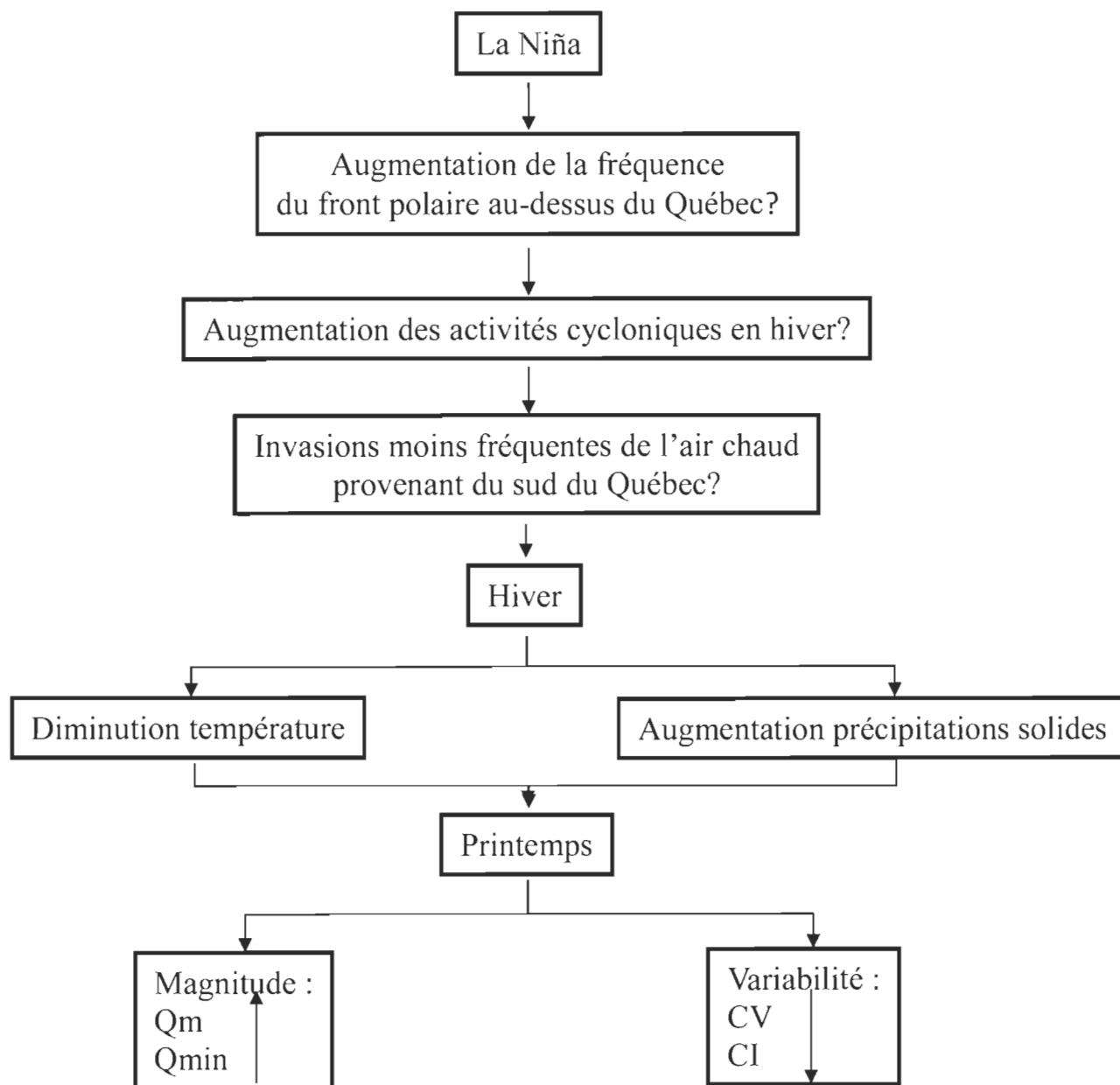


Figure 6.2 Schéma conceptuel de l'influence des épisodes de La Niña sur les caractéristiques des débits en hiver et au printemps au Québec.

CHAPITRE VII

CONCLUSION

L'oscillation australe est un phénomène climatique reconnu comme l'un des principaux facteurs qui influence la variabilité spatio-temporelle des températures, des précipitations et des débits à l'échelle planétaire (Halpert & Ropelewski, 1992; Ropelewski & Halpert, 1987, 1989; Ward et al., 2010, 2014). En ce qui concerne la température, Trenberth et Fasullo (2013) ont démontré que durant ses phases chaudes correspondant aux épisodes El Niño, l'oscillation australe amplifiait le réchauffement planétaire causé par les gaz à effet de serre d'origine anthropique tandis que durant ses phases froides correspondant aux épisodes La Niña, elle atténuait ce réchauffement. Cependant, la nature et l'ampleur de son influence varient d'une région à une autre. Au Canada, les travaux consacrés à cette influence ont démontré qu'en ce qui concerne la nature de cette influence, l'oscillation australe dans sa phase positive (El Niño) est associée à des températures généralement supérieures aux normales, mais à des précipitations inférieures aux normales durant la saison hivernale (Shabbar, 2006). Quant à l'ampleur de son influence, il est établi que l'influence de l'oscillation australe est beaucoup plus grande dans la partie ouest du Canada que dans sa partie orientale, qui inclut le Québec. Ainsi, dans cette dernière région, son influence sur les débits des rivières a été reconnue comme très faible ou inexistante dans plusieurs travaux.

Cette faible influence de l'oscillation australe sur les débits au Québec pourrait résulter de l'utilisation simultanée des phases chaudes et froides dans les travaux antérieurs. Cette approche peut ainsi « brouiller » le signal spécifique associé à chaque phase. En analysant séparément les deux phases, on peut alors amplifier ce signal et démontrer *in fine* l'ampleur de l'influence de l'oscillation australe sur les débits au Québec. Cette séparation des phases se justifie par le fait que dans une étude récente, Assani (2018) a démontré clairement que les températures estivales au Québec étaient mieux corrélées aux phases chaudes (El Niño) qu'aux phases froides (La Niña) de

l'oscillation australe. L'objectif de ce mémoire était effectivement d'analyser séparément l'influence de chacune de ces deux phases sur les débits hivernaux et printaniers. Pour atteindre cet objectif, on a tenu compte séparément des épisodes El Niño d'intensité faible à très forte et ceux de La Niña d'intensité faible à forte.

La comparaison des fréquences des coefficients de corrélation statistiquement significatifs calculés entre les débits et les phases chaudes (épisodes El Niño) et froides (épisodes La Niña) confondues d'une part, et les phases chaudes et froides analysées séparément, d'autre part, a révélé que cette fréquence était plus élevée lorsqu'on a analysé séparément les deux phases. La comparaison entre les deux phases a démontré que cette fréquence était plus élevée pendant les phases chaudes (19,3 %) que pendant les phases froides (6,5 %) de l'oscillation australe. En d'autres termes, les débits des rivières sont plus fréquemment corrélés aux épisodes El Niño qu'aux épisodes La Niña au Québec. Ensuite, l'analyse de l'intensité de chaque phase a démontré que l'influence de l'intensité sur les débits lors de la phase chaude est quasi négligeable en hiver alors qu'au printemps, ce sont surtout les épisodes d'intensité modérée à très forte qui étaient fréquemment corrélés aux débits. Cette tendance a été observée aussi pendant les phases froides durant les deux saisons. En ce qui concerne l'influence des indices des phases, il ressort de cette étude que durant les phases chaudes, ce sont des indices hivernaux de l'oscillation australe sont plus fréquemment corrélés aux débits, aussi bien hiver qu'au printemps. Durant les phases froides, ce sont les indices automnaux et estivaux de l'oscillation australe qui sont plus fréquemment corrélés aux débits en hiver alors que seuls les indices automnaux le sont au printemps.

En ce qui concerne l'influence saisonnière, on a démontré que l'influence de phases chaudes et froides sur les débits se manifeste plus fréquemment en hiver qu'au printemps au Québec. Toutefois, cette influence n'est pas spatialement homogène. En hiver, les phases chaudes sont plus fréquemment corrélées aux débits des rivières de la région hydroclimatique du Sud-Ouest que les deux de deux autres hydroclimatiques. Au printemps, cette corrélation est aussi observée, quasi dans les mêmes proportions, dans les régions hydroclimatiques du Sud-Ouest et de l'Est. Quant aux phases froides,

elles sont fréquemment corrélées aux débits des rivières de la région hydroclimatique du sud-est en hiver, mais aux débits des rivières de la région hydroclimatique du Sud-Ouest au printemps.

Quant à la nature de la relation entre les deux phases de l'oscillation australe et les débits des rivières, il est apparu que les phases chaudes (épisodes El Niño) sont généralement corrélées positivement aux débits alors que les phases froides (épisodes La Niña) le sont globalement négativement aussi bien en hiver qu'au printemps. Il s'ensuit que les épisodes El Niño sont associés à une hausse de la magnitude et de la variabilité des débits, mais une occurrence tardive des débits maximums et minimums journaliers en hiver et au printemps. Cette tendance est aussi observée lors des épisodes de La Niña, à l'exception de la variabilité des débits qui diminue. Néanmoins, pour mieux expliquer l'influence de ces phases sur la dynamique des débits printaniers et hivernaux au Québec méridional, il faudra mieux comprendre comment les épisodes modifient les régimes de températures et des précipitations à l'hiver. En effet, ce sont ces variables qui pourront expliquer pourquoi les débits varient ainsi. De plus, il faudra s'intéresser à l'interaction entre l'oscillation australe et les autres téléconnexions si on souhaite éventuellement prédire la dynamique des cours d'eau lors des épisodes El Niño et La Niña.

BIBLIOGRAPHIE

- Amarasekera, K. N., Lee, R. F., Williams, E. R., & Eltahir, E. A. B. (1997). ENSO and the natural variability in the flow tropical rivers. *Journal of Hydrology*, 200, 24-39. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03340-9](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03340-9)
- Anctil, F., & Coulibaly, P. (2004). Wavelet analysis of the interannual variability in Southern Québec streamflow. *Journal of Climate*, 17(1), 163-173. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<0163:WAOTIV>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<0163:WAOTIV>2.0.CO;2)
- Assani, A. (2018). Comparison of the temporal variability of maximum daily temperatures for summer months in relation to El Niño events in Southern Quebec. In *Extreme Weather* (pp. 1-10). INTECH. <https://doi.org/10.5772/intechopen.74548>
- Assani, A. A., Charron, S., Matteau, M., Mesfioui, M., & Quessy, J.-F. (2010). Temporal variability modes of floods for catchments in the St. Lawrence watershed (Quebec, Canada). *Journal of Hydrology*, 385(1-4), 292-299. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.02.031>
- Assani, A. A., Lajoie, F., Vadnais, M.-E., Benseghir, S., & Bureau, C. (2006). Modes de variabilité temporelle des débits moyens annuels et leurs liens avec les indices climatiques au Québec (Canada). *Géographie Physique et Quaternaire*, 60(3), 215-224. <https://doi.org/10.7202/017996ar>
- Assani, A. A., Landais, D., Mesfioui, M., & Matteau, M. (2010). Relationship between the Atlantic Multidecadal Oscillation index and variability of mean annual flows for catchments in the St. Lawrence watershed (Quebec, Canada) during the past century. *Hydrology Research*, 41(2), 115. <https://doi.org/10.2166/nh.2010.055>
- Assel, R. A. (1998). The 1997 ENSO event and implication for North American Laurentian Great Lakes winter severity and ice cover. *Geophysical Research Letters*, 25(7), 1031-1033. <https://doi.org/10.1029/98GL00720>
- Assel, R. A., Janowiak, J. E., & Norton, D. C. (2000). Laurentian Great Lakes ice and weather conditions for the 1998 El Niño winter. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81(4), 703-718.
- Astrade, L. (1998). La gestion des barrages-réservoirs au Québec : exemples d'enjeux environnementaux. *Annales de Géographie*, 590-609.

- Beauchamp, M., Assani, A. A., Landry, R., & Massicotte, P. (2015). Temporal variability of the magnitude and timing of winter maximum daily flows in southern Quebec (Canada). *Journal of Hydrology*, 529, 410-417. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.07.053>
- Bjerknes, J. (1969). Atmospheric teleconnections from the Equatorial Pacific. *Monthly Weather Review*, 97(3), 163-172. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1969\)097<0163:ATFTEP>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1969)097<0163:ATFTEP>2.3.CO;2)
- Bonsal, B., & Shabbar, A. (2008). Impacts of Large-Scale Circulation Variability on Low Streamflows over Canada: A Review. *Canadian Water Resources Journal / Revue Canadienne Des Ressources Hydriques*, 33(2), 137-154. <https://doi.org/10.4296/cwrj3302137>
- Bonsal, B., & Shabbar, A. (2010). *Large-scale climate oscillations influencing Canada, 1900-2008*. Ottawa, ON. Retrieved from <http://www.biodivcanada.ca/default.asp?lang=En&n=137E1147-0>
- Clarke, A. J. (2008). *An introduction to the dynamics of El Niño & the Southern Oscillation*. (Elsevier, Ed.). London, UK.
- Coulibaly, P., Anctil, F., Rasmussen, P., & Bobe, B. (2000). A recurrent neural networks approach using indices of low- frequency climatic variability to forecast regional annual runoff. *Hydrological Processes*, 14, 2755-2777. [https://doi.org/10.1002/1099-1085\(20001030\)14:15<2755:AID-HYP90>3.0.CO;2-9](https://doi.org/10.1002/1099-1085(20001030)14:15<2755:AID-HYP90>3.0.CO;2-9)
- Coulibaly, P., & Burn, D. H. (2004). Wavelet analysis of variability in annual Canadian streamflows. *Water Resources Research*, 40(3). <https://doi.org/10.1029/2003WR002667>
- Coulibaly, P., & Burn, D. H. (2005). Spatial and temporal variability of Canadian seasonal streamflows. *Journal of Climate*, 18(1), 191-210. <https://doi.org/10.1175/JCLI-3258.1>
- Croley, T. E. (2003). Great Lakes climate change hydrologic impact assessment I.J.C. Lake Ontario-St. Lawrence River Regulation Study. *Components*, 77.
- Dahlman, L. (2009). Climate Variability: Oceanic Niño Index. Retrieved from <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-variability-oceanic-niño-index>

- Dubeau, S. (2014). *Effets de l'épisode El Nino 2009-2010 sur les variables hydroclimatiques, physico-chimiques et l'abondance des espèces herbacées des îlots en aval du réservoir Taureau (rivière Matawin, Québec, Canada)*. Université du Québec à Trois-Rivières.
- GIEC. (2013). *Changement climatiques 2013 – Les éléments scientifiques*.
- Golden Gates Weather. (2017). El Niño and La Niña Years and Intensities. Retrieved from <http://ggweather.com/enso/oni.htm>
- Guay, J.-F., Rasmussen, P. F., Slivitzky, M., & Bobée, B. (1999). *Les oscillations climatiques à moyenne fréquence : causes possibles, mécanismes et effets connus au Canada et au Québec*. Québec : INRS-Eau.
- Halpert, M. S., & Ropelewski, C. F. (1992). Surface temperature patterns associated with the Southern Oscillation. *Journal of Climate*, 5, 577-593.
- Hydro-Québec. (2015). *Rapport annuel 2015 : Voir grand avec notre énergie propre*. Québec.
- Jia, S., Zhu, W., Yan, H., Duan, S., & Yao, Z. (2011). El Nino - Southern Oscillation and water resources in the headwaters region of the Yellow River : links and potential for forecasting. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 1273-1281. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1273-2011>
- Kovats, R., Bouma, M., & Haines, A. (1999). *El Niño and health protection of the human environment*. World Health Organization. Genève.
- Lau, K.-M., & Yang, S. (2002). Walker circulation. *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*, 1–6. <https://doi.org/10.1006/rwas.2002.0450>
- Lofgren, B. M., Quinn, F. H., Clites, A. H., Assel, R. A., Eberhardt, A. J., & Luukkonen, C. L. (2002). Evaluation of potential impacts on Great Lakes water resources based on climate scenarios of two GCMs. *Journal of Great Lakes Research*, 28(4), 537–554. [https://doi.org/10.1016/S0380-1330\(02\)70604-7](https://doi.org/10.1016/S0380-1330(02)70604-7)
- Merle, J., & Hisard, P. (1990). Interactions océan-atmosphère dans les Tropiques. *Annales de Géographie*, 99(553), 273–290. <https://doi.org/10.3406/geo.1990.20972>
- National Centers for Environmental Information (NCEI). (2016). El Niño/Southern Oscillation (ENSO) Technical Discussion. Retrieved April 1, 2016, from <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/enso-tech.php>

- NOAA. (2016). El Niño & La Niña (El Niño-Southern Oscillation). Retrieved February 18, 2016, from <https://www.climate.gov/enso>
- Poff, N. L., Allan, J. D., Bain, M. B., & Karr, J. R. (1997). The natural flow regime. *BioScience*, 47, 769–784. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/1313099>
- Redmond, K. T., & Koch, R. W. (1991). Surface climate and streamflow variability in the Western United States and their relationship to large-scale circulation indices. *Water Resources Research*, 27, 2381-2399. Retrieved from http://one.geol.umd.edu/enso/readings/redmond_koch91.pdf
- Ropelewski, C. F., & Halpert, M. S. (1986). North american precipitation and temperature patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation (ENSO). *Monthly Weather Review*, 114, 2352-2362. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1986\)114<2352:napatp>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1986)114<2352:napatp>2.0.co;2)
- Ropelewski, C. F., & Halpert, M. S. (1987). Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation. *Monthly Weather Review*, 115(8), 1606-1626. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1987\)115<1606:GARSPP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1987)115<1606:GARSPP>2.0.CO;2)
- Ropelewski, C. F., & Halpert, M. S. (1989). Precipitation patterns associated with the high index phase of the Southern Oscillation. *Journal of Climate*, 2, 268-284. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1989\)002<0268:PPAWTH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1989)002<0268:PPAWTH>2.0.CO;2)
- Sellars, C. D., Garrett, M., & Woods, S. (2008). Influence of the Pacific Decadal Oscillation and El Niño Southern Oscillation on operation of the Capilano Water Supply Reservoir, Vancouver, British Columbia. *Canadian Water Resources Journal*, 33(2), 155-164. <https://doi.org/10.4296/cwrj3302155>
- Shabbar, A. (2006). The impact of El Niño-Southern Oscillation on the Canadian climate. *Advances in Geosciences*, 6, 149-153. <https://doi.org/10.5194/adgeo-6-149-2006>
- Shabbar, A., Bonsal, B., & Khandekar, M. (1997). Canadian precipitation patterns associated with the Southern Oscillation. *Journal of Climate*, 10(12), 3016-3027. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1997\)010<3016:CPPAWT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1997)010<3016:CPPAWT>2.0.CO;2)
- Shabbar, A., & Khandekar, M. (1996). The impact of El Niño-Southern Oscillation on the temperature field over Canada: Research note. *Atmosphere-Ocean*, 34(2), 401-416. <https://doi.org/10.1080/07055900.1996.9649570>
- Trenberth, K. E. (1997). The Definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(12), 2771-2777.

- Trenberth, K. E., & Fasullo, J. T. (2013). An apparent hiatus in global warming? *Earth's Future*, 19-32. <https://doi.org/10.1002/2013EF000165>
- Trenberth, K. E., & Stepaniak, D. P. (2001). Indices of El Niño evolution. *Journal of Climate*, 14(8), 1697-1701. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<1697:LIOENO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<1697:LIOENO>2.0.CO;2)
- Wang, C., Deser, C., & Yu, J. (2012). El Niño and Southern Oscillation (ENSO): A review. In *Coral Reefs of the Eastern Pacific* (pp. 3-19). Retrieved from http://192.111.123.246/phod/docs/ENSO_Revision.pdf
- Ward, P. J., Beets, W., Bouwer, L. M., Aerts, J. C. J. H., & Renssen, H. (2010). Sensitivity of river discharge to ENSO. *Geophysical Research Letters*, 37(12), 1-6. <https://doi.org/10.1029/2010GL043215>
- Ward, P. J., Eisner, S., Flörke, M., Dettinger, M. D., & Kummerow, M. (2014). Annual flood sensitivities to El Niño-Southern Oscillation at the global scale. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(1), 47-66. <https://doi.org/10.5194/hess-18-47-2014>
- Wei, W., Chang, Y., & Dai, Z. (2014). Streamflow changes of the Changjiang (Yangtze) River in the recent 60 years: Impacts of the East Asian summer monsoon, ENSO, and human activities. *Quaternary International*, 336, 98-107. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2013.10.064>
- Xu, C., & Zhang, Q. (2007). Possible influence of ENSO on annual maximum streamflow of the Yangtze River, China. *Journal of Hydrology*, 333, 265-274. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.08.010>
- Zelle, H., Appeldoorn, G., Burgers, G., & van Oldenborgh, G. J. (2004). The relationship between sea surface temperature and thermocline depth in the Eastern Equatorial Pacific. *Journal of Physical Oceanography*, 34(3), 643-655. <https://doi.org/10.1175/2523.1>